国外工业控制与智能制造丛书

HZ BOOKS 华章教育

McGraw Hill Education

机电一体化与测量系统

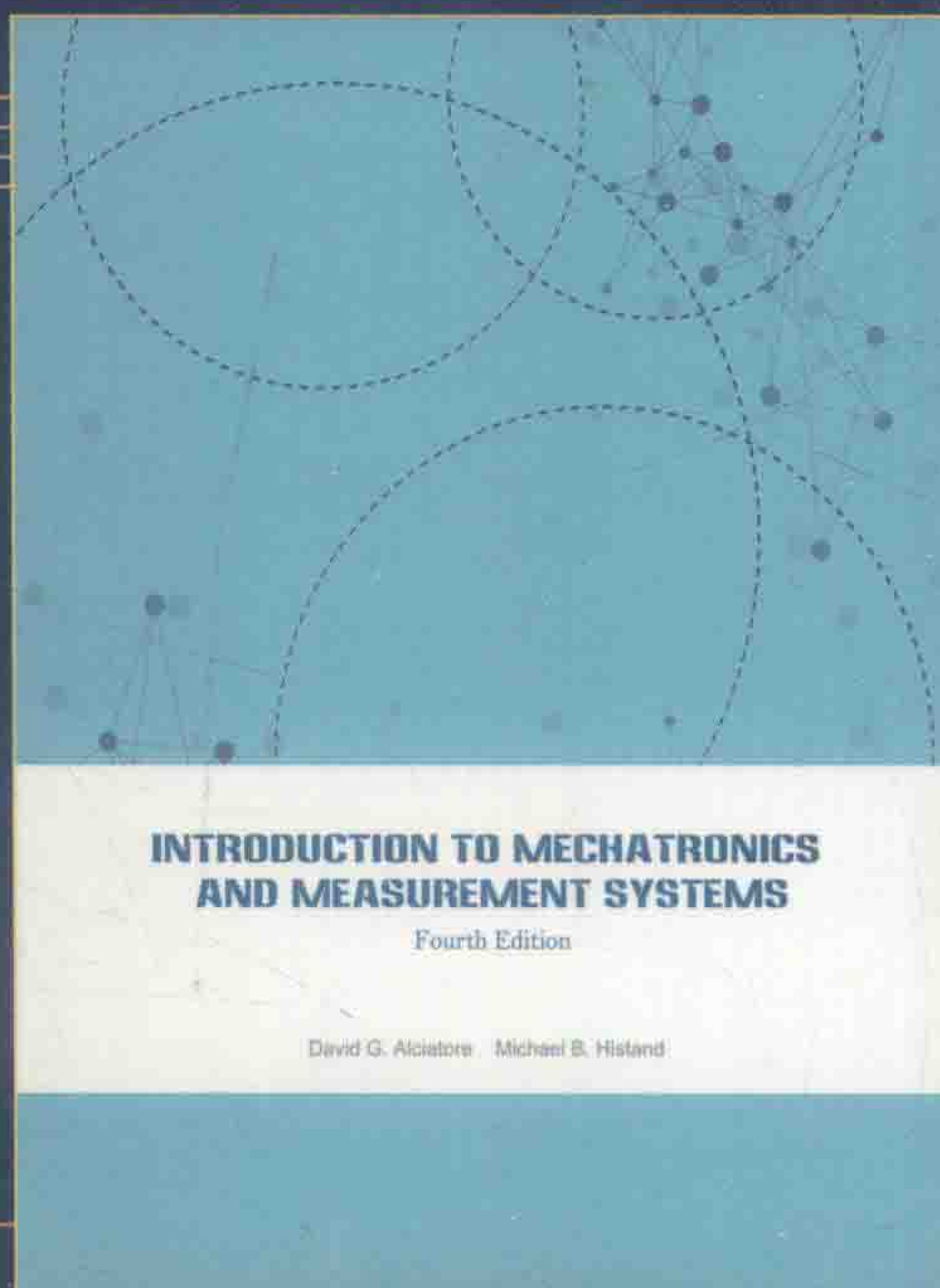
（原书第4版）

[美] 戴维·G. 阿尔恰托雷（David G. Alciatore）
迈克尔·B. 希斯坦德（Michael B. Histand） 著

贾民平 许飞云 胡建中 译

Introduction to Mechatronics and Measurement Systems

Fourth Edition





机械工业出版社
China Machine Press

本书是关于电子元器件应用于机械装置中的书籍，对机电一体化各个领域的基础知识进行了较精辟的全面介绍，先从简单的电路元器件和半导体器件入手，系统论述了有关电路和电子元件、半导体电子学、模拟信号处理、数字电路、微控制器编程、数据采集、传感器、执行器以及机电一体化系统的控制体系等方面的内容，并着重介绍了传感器、微控制器编程和执行器。每章都引入了课堂讨论题目和设计实例，十分有利于读者对所述内容的深入思考和掌握运用。本书可作为高等院校现代仪器和测量、电气和机械工程以及机电一体化等相关专业的教材和教学参考书，同时也可供从事相关专业技术工作的广大工程技术人员阅读参考。

本书特色

- 理论知识扎实，循序渐进地介绍了全面的电气领域基础知识。
- 理论与实际结合，着重于机械电子系统的设计和实现。
- 扩展了可编程逻辑控制器（PLC）和虚拟仪器数据采集的内容。
- 配有设计实例，有助于读者由浅入深地掌握所学知识。



上架指导：机电一体化



www.mheducation.com

投稿热线：(010) 88379604
客服热线：(010) 88378991 88361066
购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259



华章网站：www.hzbook.com
网上购书：www.china-pub.com
数字阅读：www.hzmedia.com.cn

ISBN 978-7-111-60146-3



定价：99.00元

封面设计·锡 彬

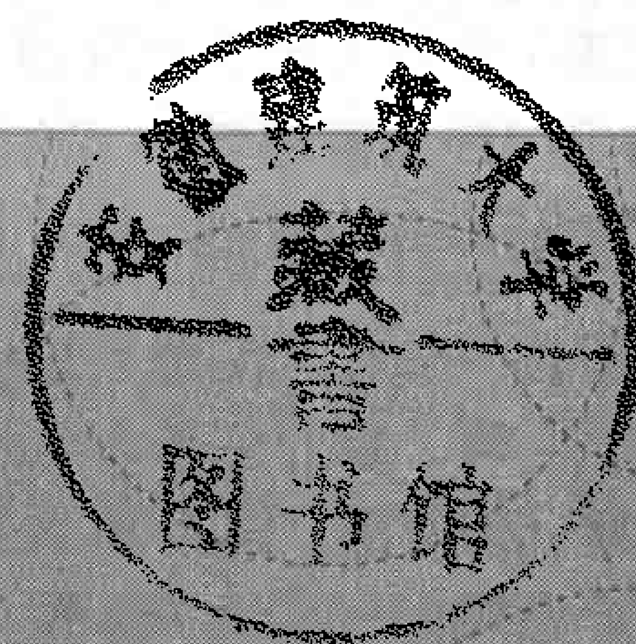
机电一体化与测量系统

（原书第4版）

[美] 戴维·G. 阿尔恰托雷（David G. Alciatore）著
迈克尔·B. 希斯坦德（Michael B. Histand）
贾民平 许飞云 胡建中 译

Introduction to Mechatronics and Measurement Systems

Fourth Edition





机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

机电一体化与测量系统（原书第 4 版）/（美）戴维·G. 阿尔恰托雷（David G. Alciatore），（美）迈克尔·B. 希斯坦德（Michael B. Histand）著；贾民平，许飞云，胡建中译．—北京：机械工业出版社，2018.6

（国外工业控制与智能制造丛书）

书名原文：Introduction to Mechatronics and Measurement Systems, Fourth Edition

ISBN 978-7-111-60146-3

I. 机… II. ①戴… ②迈… ③贾… ④许… ⑤胡… III. ①机电一体化－高等学校－教材 ②测量系统－高等学校－教材 IV. ① TH-39 ② P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 123653 号

本书版权登记号：图字 01-2014-4761

本书对机电一体化与测量系统中各个领域的知识进行了精辟全面的介绍。第 1 章介绍机电一体化和测量系统的术语。第 2 章介绍基本电路元器件和电路分析。第 3 章主要涉及半导体电子产品。第 4 章提出分析系统响应特征的方法。第 5 章涵盖运算放大器电路的设计与分析。第 6 章介绍基本的数字设备和集成电路。第 7 章介绍微控制器编程和接口，特别介绍了 PIC 微控制器和 PicBasic Pro 编程。第 8 章介绍数据处理。第 9 章介绍由传感器组成的机电一体化系统。第 10 章介绍用于驱动机电一体化系统的设备。第 11 章介绍机电一体化系统的控制系统。附录部分回顾了许多基础知识，用以支持和补充书中的主题。

本书可作为高等院校现代仪器和测量、电气和机械工程以及机电一体化等相关专业的教材和教学参考书，同时也可供从事相关专业技术工作的广大工程技术人员阅读参考。

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：蒋　越	责任校对：殷　虹
印　　刷：北京诚信伟业印刷有限公司	版　　次：2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
开　　本：185mm×260mm　1/16	印　　张：22.25
书　　号：ISBN 978-7-111-60146-3	定　　价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991　88361066　　投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294　88379649　68995259　　读者信箱：hzjsj@hzbook.com

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

华章网站：www. hzbook. com

电子邮件：hzjsj@hzbook. com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

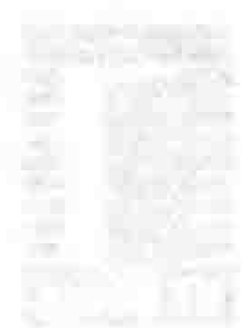
伴随着集成电路和计算机的出现，传统工程学科的界限已经变得越来越模糊，机械与电子工程领域尤为明显。机电一体化技术是将机械技术、电工电子技术、微电子技术、信息技术、传感器技术、接口技术、信号变换技术等多种技术有机地结合起来，并综合应用到实际中的综合技术。工业生产由“机械电气化”迈入“机电一体化 ”阶段。

工业 4.0 受益于多学科交叉的机电一体化技术，可以降低不断融合的信息技术和运营技术的复杂性。通过简化设计、调试和运行，机电一体化可以开发出更好的设备。通过让机械设备制造商来调试、编程和连接设备，机械的自我优化、选型合适的先进电动机和变频器系统可以使生产制造和供应链自动化更灵活、效率更高。

本书为学生提供测量理论、电子电路、计算机接口、传感器、执行器及机电整合系统的分析、设计和综合跨学科知识与方法，这种跨学科方法对学生是很有价值的，因为几乎所有新设计的工程产品都属于某一种机电一体化系统。在内容编排上，本书从基础层面向应用层面逐渐深化，初学者可以边学边用，循序渐进。书中提供的大量课堂讨论项目与实际示例，为读者掌握本课程提供了非常有用的帮助。

正是本书的独特性，使我们决定翻译并奉献给读者，希望能为涉及机电一体化专业的本科生提供学习和参考教材，也为从事机电一体化开发应用的工程师提供帮助。

本书由东南大学的贾民平、许飞云、胡建中翻译，其中贾民平负责前言、网络资源的补充材料、第 5～8 章以及附录的翻译，许飞云负责第 1、2、3、9 章的翻译，胡建中负责第 4、10、11 章的翻译。博士生朱林、张菀、鄢小安参与了部分章节的翻译工作。由于时间紧张和译者的水平有限，难免存在偏差和失误，恳请读者批评指正。



前　言

方法

伴随着集成电路和计算机的出现，传统工程学科的典型界限已经变得模糊。在机械与电气工程领域尤为明显，今天的产品包含着相互依存的电气组件和机械组件之间的装配关系。机电一体化领域扩大了传统机电领域的范围。机电一体化的定义为涉及系统分析、设计、合成和选择的研究领域，其中系统把现代控制和微处理器与电子和机械组件相结合。

本书可用于以下课程的教学：(1)现代仪表测量课程；(2)取代传统电路和仪器的混合机电工程的课程；(3)独立的机电一体化课程；(4)机电一体化的第一门课程。第二门课程(即混合课程)有助于减少典型的机械工程课程的课时。第三、四门课程可能包括新的跨学科的课程和发展课程。

目前，许多学科不包括机电一体化课程，但包括其他元素和一些更传统的课程。机电一体化课程的目的是为学生提供一个集中的跨学科体验，其中包括传统课程的重要部分以及现代电子和计算机控制技术的发展。重要的传统部分包括测量理论、电子电路、计算机接口、传感器、执行器及机电一体化系统的分析、设计和合成。这种跨学科的方法对学生是有价值的，因为几乎所有新的工程产品都属于机电一体化系统。

第 4 版中的新增内容

本书对前一版进行了改进、更新与补充：

- 新增部分实际考虑了机电系统的设计和实现，包括电路结构、电气测量、电源选择、通用集成电路的设计及 PIC 微控制器的电路设计。
- 扩展了 LabVIEW 数据采集部分，包括一个完整的音乐采样示例(具有网络资源)。
- 更多的网站资源，包括整本书引用及描述的网络链接和在线视频演示。
- 可编程序逻辑控制器(PLC)的扩展部分，包括带有基本示例的梯形逻辑。
- 与课堂讨论项目所对应的图像可以帮助激发学生的想象力，使学生产生兴趣并提高本书的视觉效果。
- 章末的附加问题将给老师和学生提供更多作业和实践的选择。
- 本书进行了修正和许多小的改进。

主要内容

第 1 章介绍了机电一体化和测量系统的术语。第 2 章对基本的电气关系、电气元件和电路分析进行了回顾。第 3 章主要涉及半导体电子产品。第 4 章介绍分析机电一体化和测量系统响应特征的方法。第 5 章涵盖了模拟信号处理的基本原理及运算放大器电路的设计与分析。第 6 章介绍了基本的数字设备和集成电路的使用。第 7 章介绍了微控制器的编程和接口，特别介绍了 PIC 微控制器和 PicBasic Pro 编程。第 8 章介绍了数据获取以及如何将计算机与测量系统连接起来。第 9 章介绍了机电一体化系统中许多常见的传感器。第 10 章介绍了用于驱动机电一体化系统的设备。最后，第 11 章介绍了机电一体化系统的控制架构，并给出了研究案例。同时，第 11 章还介绍了控制理论及其在机电一体化系统设计中的作用。附录部分回顾了单位系统的基础知识、数据统计、误差分析及材料力学，用以支持和补充书

中测量系统的主题。

在本书的编写和修改过程中难免存在错误，尽管作者、编辑和其他相关人员在很大程度上已经注意到这些。发现错误时，他们会把错误注明在本书的网站：www. mechatronics. colostate. edu/book/corrections _ 4th_edition. html。读者购书后可访问这个页面来查看本书是否有任何修正记录。另外，如果读者对本书未来版本的改进有一些建议和请求，请让我们知道。作者邮箱：David. Alciatore@colostate edu。

学习工具㊀

本书中所包含的课堂讨论(CDI)可供学生练习，并指导了课堂上的合作学习。每一章后面的练习也可以作为课外作业的补充。很多提示和 CDI 的部分答案都可以在网站 www. mechatronics. colostate. edu 中找到。在本书中提供的分析和例子可以提高学生的应用能力。为了加强学生的学习，伴随本书精心设计了实验室练习及配合讲座。补充的实验室练习手册也出于这一目的(有关更多信息，请参见 www. mechatronics. colostate. edu/lab_book. html)。课堂讨论、设计实例及实验室练习的结合可以给学生提供一个实用方法，为未来的设计工作提供一个有用的框架。

本书除了分析实例和设计实例以外，还包括渐进设计实例。实例包括微控制器、输入和输出设备、传感器、执行器、电子支持产品和软件的机电一体化系统。相关的设计材料覆盖了全书。这样可以让学生利用“分而治之”的方法看到一个复杂设计的创建过程。此外，渐进设计帮助学生联系并感受本书前面部分提出的电路原理和系统响应的价值。第 1 章的有趣实例应用可以帮助学生了解“整体的框架”。

致谢

为了确保本书的准确性，本书已经在科罗拉多州立大学和怀俄明大学经过了课堂测试。感谢这两所学校的学生，他们在整个过程中为本书提供了有价值的反馈。此外，还要感谢许多评论者及他们有价值的意见。

YangQuan Chen 犹他州立大学

Meng-Sang Chew 利哈伊大学

Mo-Yuen Chow 北卡罗来纳州立大学

Burford Furman 圣何塞州立大学

Venkat N. Krovi 纽约州立大学布法罗分校

Satish Nair 密苏里大学

Ramendra P. Roy 亚利桑那州立大学

Ahmad Smaili 黎马嫩哈里里加拿大大学

David Walrath 怀俄明大学

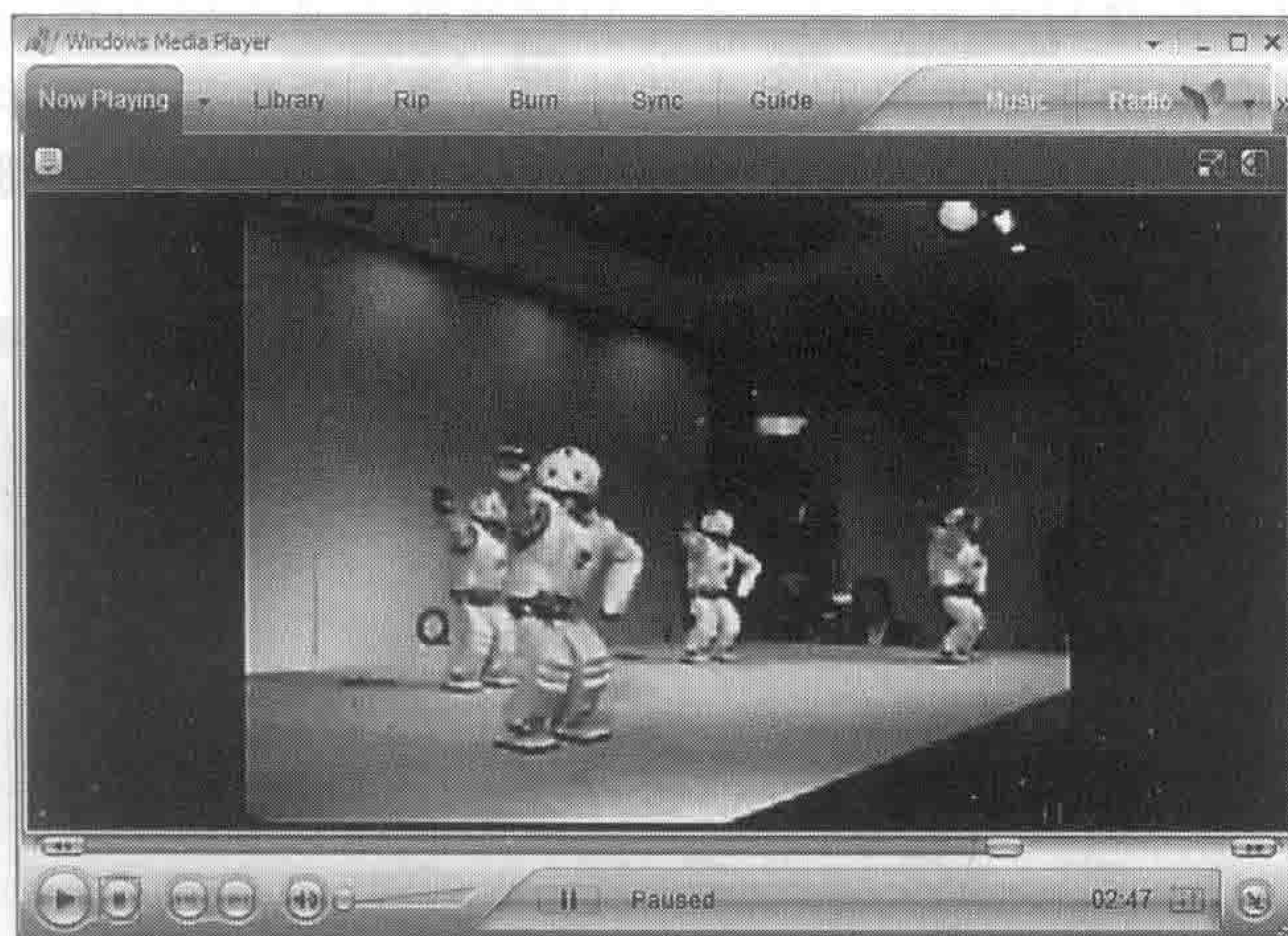
网络资源

出现在书中的交叉引用资源见网站 www. mechatronics. colostate. edu。

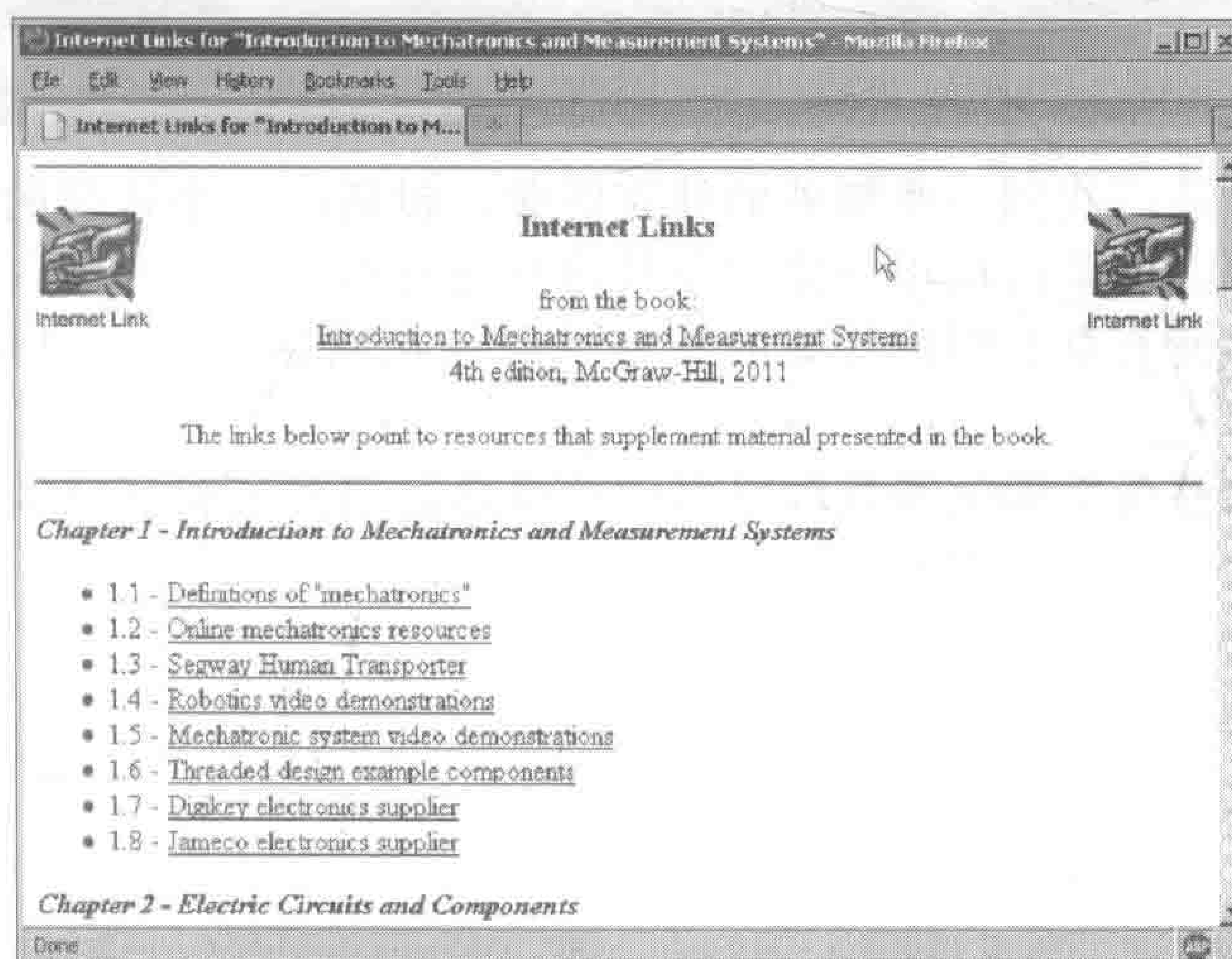
下面为所提供的资源：

可以获取在线视频演示。在线视频是 Windows 媒体(WMV)文件格式的，可以在互联网浏览器中进行浏览。视频显示并描述了电子元器件、机电一体化设备、系统实例及实验室练习演示。

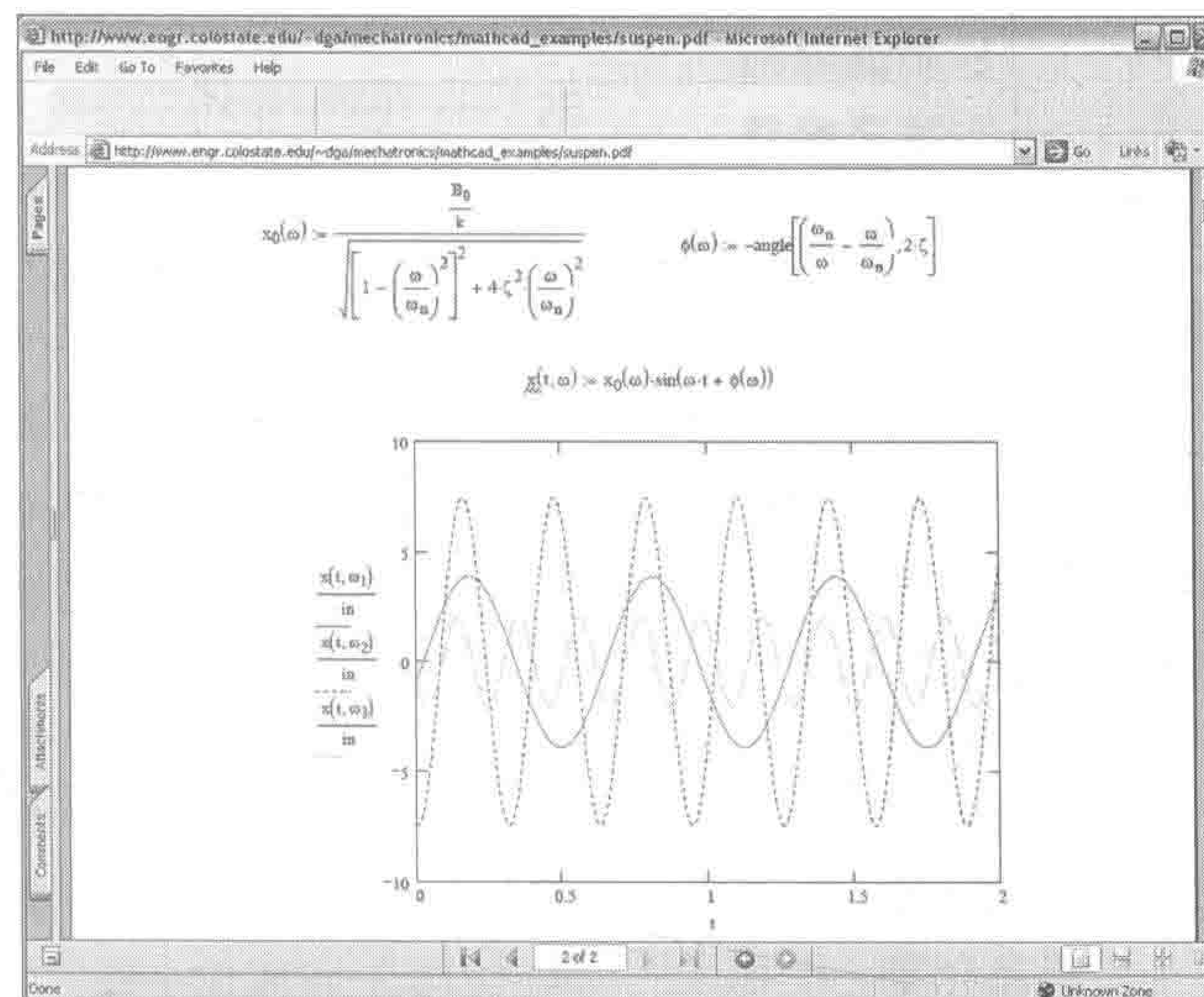
㊀ 关于本书教辅资源，只有使用本书作为教材的教师才可以申请，需要的教师可向麦格劳・希尔教育出版公司北京代表处申请，电话 010-5799 7618/7600，传真 010-5957 5582，电子邮件 instructorchina@mheducation. com 。——编辑注



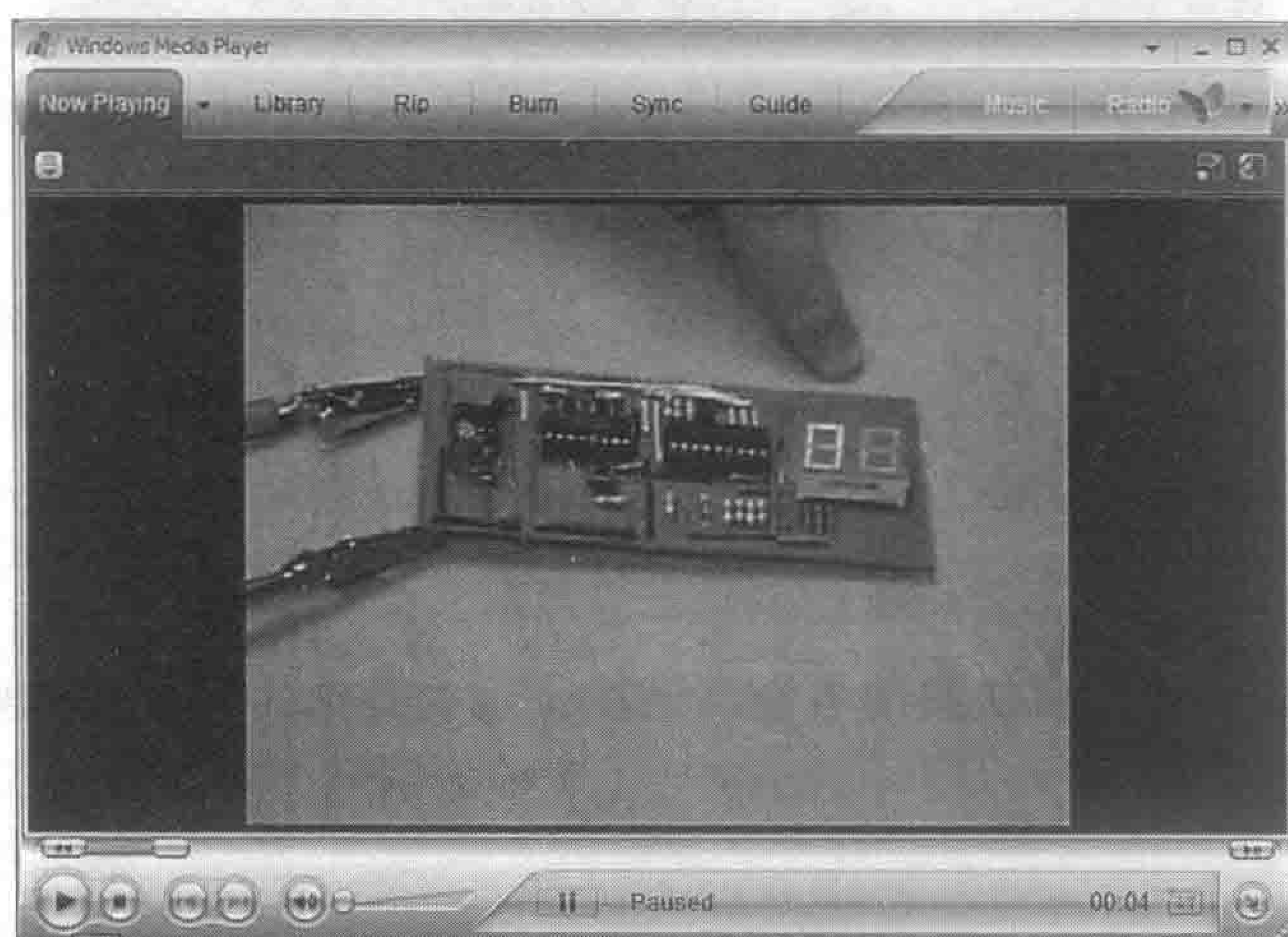
在本书网站上还可找到附加的网络资源链接。这些链接为学生和教师扩大他们的知识面提供了可靠的信息来源。



本书网站还提供了执行分析计算的 MathCAD 文件。这些文件可以编辑用于执行类似及扩展的分析。它的 PDF 版本也为那些无法获得 MathCAD 软件的群体提供了便利。



实验室练习资料可以在与本书匹配的补充的实验室练习手册中找到。实验室手册提供了有用的实践练习，它有助于学生巩固书中的知识，并让学生运用所学的知识。大部分的资源和短视频演示都可以在本书的网站中找到。实验室练习手册的信息，请访问 www. mechatronics. colostate. edu/lab_book. html。

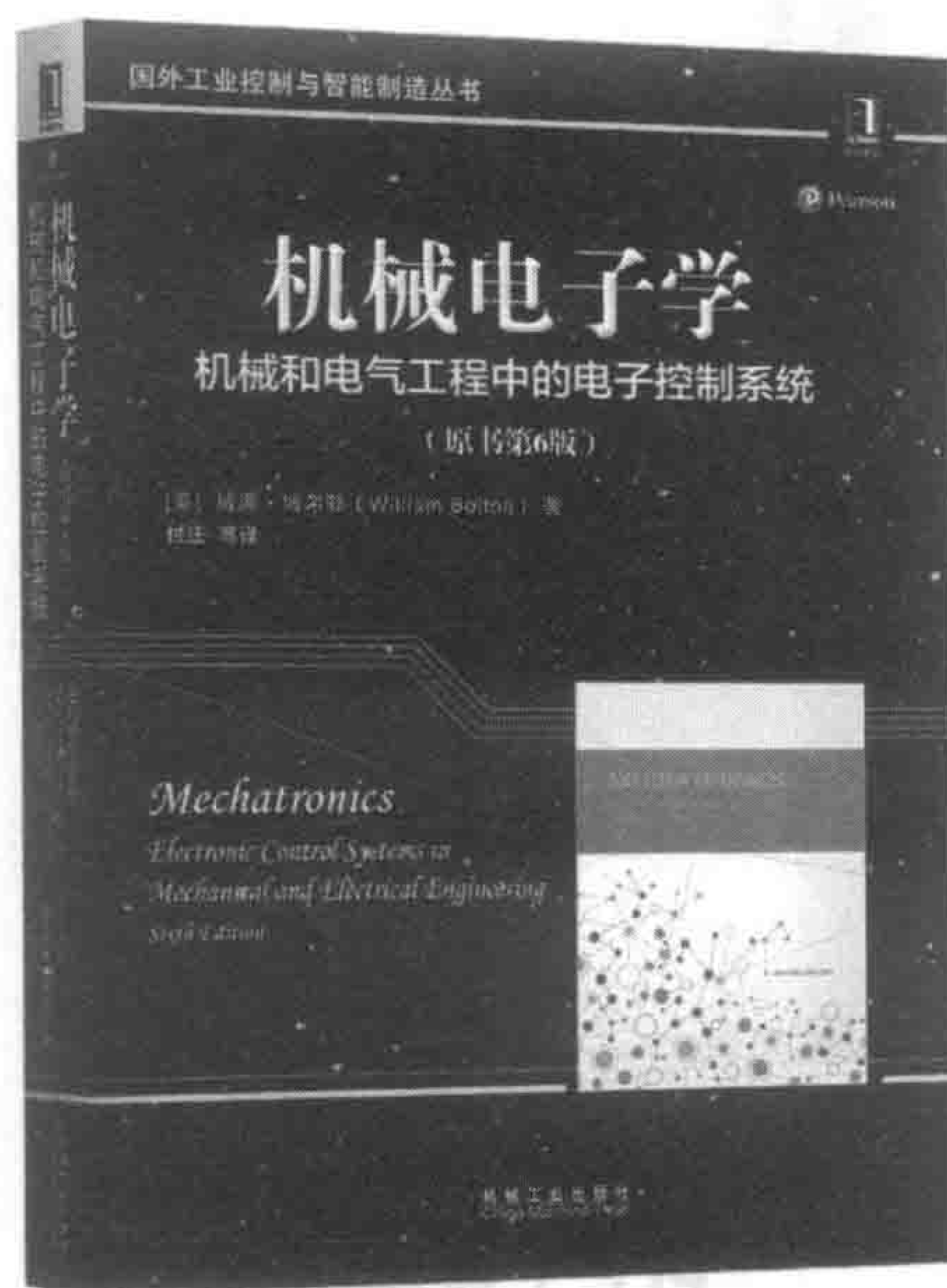


在本书的网站上还可找到一些额外的补充资源，包括：一个建议的课程大纲、一个典型的实验室教学大纲、课堂讨论项目提示及其他补充材料。

此外，一个包含所有章节问题答案的加密手册可在网站 www. mhhe. com/alciatore 中找到。

这些补充材料能够帮助学生和教师将书中的概念运用到实验室或实际情况中，以获取学习经验。

推荐阅读



机械电子学：机械和电气工程中的电子控制系统（原书第6版）

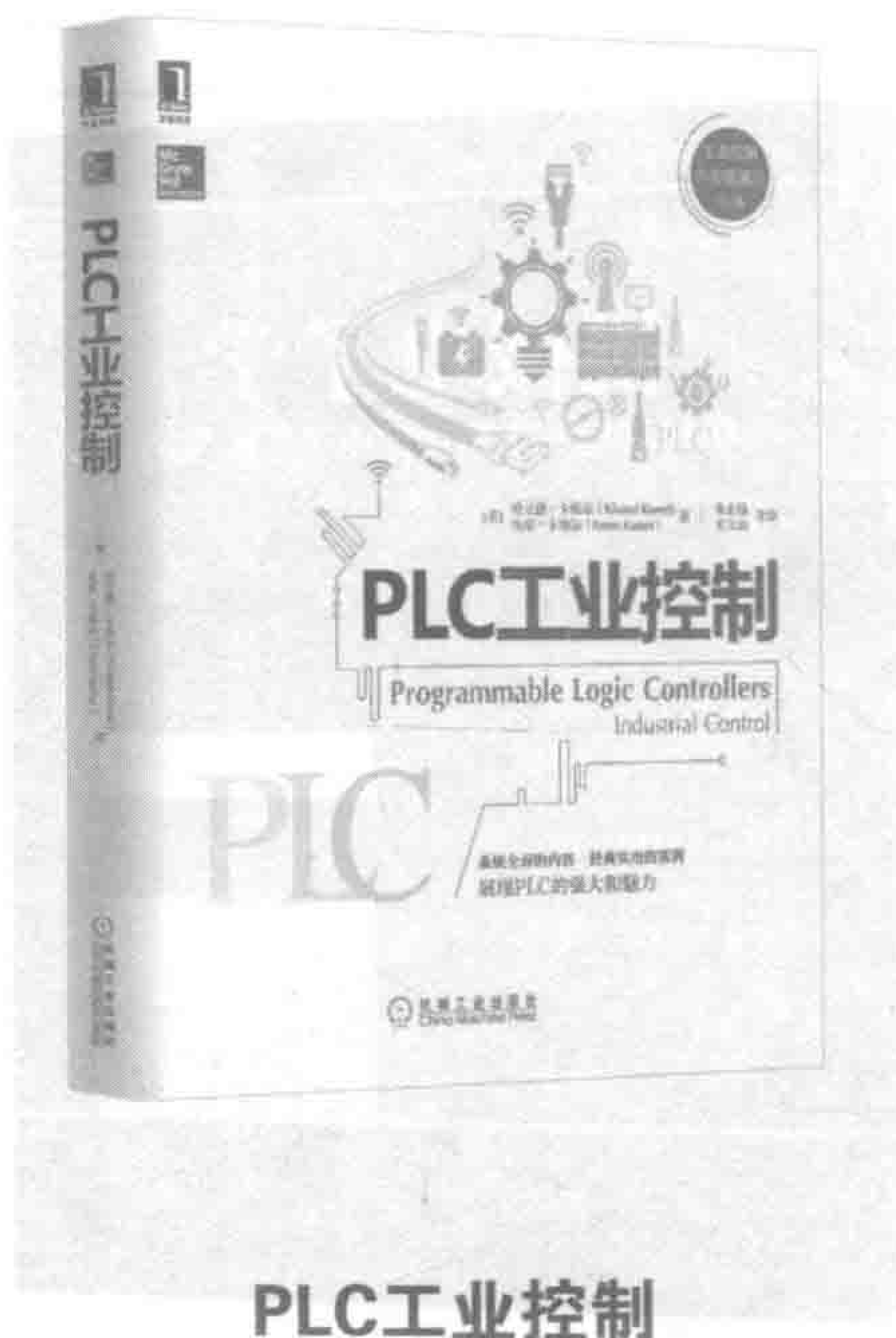
作者：[英]威廉·博尔顿（William Bolton） 译者：付庄 等

书号：978-7-111-59955-5 定价：129.00元

机械电子学是电子工程、机械工程、控制和计算机工程的集成，它处在无数设备、过程和技术的核心。从自动对焦照相机，到汽车发动机管理系统，从达到最新技术发展水平的机器人，到普通的洗衣机，都离不开机械电子学知识和技术。本书是最新版第6版，理论讲解深入浅出，体系结构完整、机械学与电子学知识紧密结合，习题丰富，一直被国外各大学采用，是该领域高等院校本科生、研究生或工程技术人员的必备读物。

本书对机械电子学领域做了清晰和全面的介绍，新增了更多的机电系统专题和关于机器人系统的内容，涵盖了传感器与信号调理、数字信号、数字逻辑、数据显示、气动和液压驱动系统、机械驱动系统、电气驱动系统、系统模型、系统的动态响应、系统传递函数、频率响应、闭环控制系统、人工智能、微处理器、输入输出系统、PLC、通信系统、故障检测、机电系统设计案例等，为形成一种真正的跨学科和综合化的工程方法提供了一个思维框架，是一本多学科交叉融合的综合性教材，有助于读者获得所需的综合能力来理解和设计机电一体化系统。

推荐阅读



PLC工业控制

作者：（美）哈立德·卡梅（Khaled Kamel）埃曼·卡梅（Eman Kamel）译者：朱永强 王文山 等

书号：978-7-111-50785-7 定价：69.00元

本书是一本介绍PLC编程的书，其关注点集中于实际的工业过程自动控制。全书以西门子S7-1200 PLC的硬件配置和整体式自动化集成界面为基础，利用一套小型、价格适中的培训套件介绍编程概念和自动控制项目，并在每章末尾给出一些课后问题、实验设计题、编程题、调试题或者项目程序改错题，最后给了一个综合性设计项目。

本书特色：

● 内容丰富、体系完备，涉及工业自动化及过程控制的基本概念、继电器逻辑程序设计的基本知识、定时器和计数器编程、算术逻辑等常用控制指令、梯形图编程、通用设计和故障诊断技术、数字化的开环闭环过程控制等内容。

● 结构合理、讲解细致，结构由浅入深，对重点、难点进行了细致的讲解和举例分析，有利于读者自学，容易入门。

● 实践性强、案例经典，作者拥有丰富的过程控制经验，对文中的案例和课后习题都进行了精心的挑选和设计，涉及不同工业应用场合，实践性很强。

● 课后习题丰富，每章末尾有课后问题、实验设计题、编程题、调试题或者项目程序改错题，可帮助读者查漏补缺，巩固所学知识。

● 提供多媒体教学帮助。本书网站(http://www.mhprofessional.com/Programmable LogicControllers)上有一个Microsoft PowerPoint格式的多媒体演示文稿，其中包含一些用于示意PLC控制原理的模拟仿真器，可用于交互学习。

目　录

第1章 引 言

本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 定义机电一体化及重视其在现代工程设计中的重要性；
2. 识别机电一体化系统及其基本组成部分；
3. 定义一般测量系统的组成要素。

1.1 机电一体化

机械工程作为广泛的专业应用为工业革命的迅猛发展提供了必要的基础，它在19世纪初期经历了快速的增长，当时，矿山需要以前从未见过的大型水泵才能保持通风井干燥，钢铁厂所需的压力和温度也超出了当时的技术水平，运输系统需要更大的动力来运输货物；物体的结构也开始变得更大更高，产品制造从手工作坊进入大工厂。为了满足这些技术需求，人们开始专门研究和建立知识体系，这就形成了工程学科的开端。

20世纪的主要工程学科包括机械、电气、土木和化学，这些学科具有各自的知识体系、教科书和专业期刊，因为它们具有相互独立的知识和专业领域。进入大学的学生可以评估个人的智力天赋，选择其中一个领域作为专业。我们正在目睹称为信息革命的新科技和社会变革在发生，讽刺的是，在变革过程中工程专业化似乎需要既集中又多样化。半导体电子学工程的发展催生了现代的信息革命，也推动着正在改变人类生活的信息通信技术的爆炸式发展。无论从业者的标签是什么，为了今天的工程实践，必须了解处理信息的新方法，并能在产品中使用半导体电子技术。机电一体化是一个新兴的、令人感兴趣的工程领域，它是传统工程领域的一部分，且需要更广泛的方法来设计机电一体化系统。

机电一体化究竟是什么？术语**机电一体化**用来表示一个快速发展的跨学科工程领域，主要研究通过控制架构来协调使用机械和电子元器件集成的产品设计。术语“机电一体化”的其他定义可以在网络链接1.1中找到。机电一体化在20世纪60年代末创造于日本，然后传播到欧洲，现在在美国得到广泛应用。机电一体化系统设计中的重要学科包括机械、电子、控制和计算机工程。机电一体化系统工程师必须能够设计和选择模拟和数字电路、微处理器、机械装置、传感器、执行器以及控制器，使得最终产品实现所期望的目标。

机电一体化系统有时称为智能设备。虽然术语智能很难精确定义，但在工程意义上，其含义是在复杂设计中使用诸如逻辑、反馈和计算元素，使得设计的产品可以模拟人类的思维过程。将机电一体化系统设计划分到传统的工程领域内是很不容易的，因为它需要多学科领域的知识。机电一体化系统设计师必须是一个通才，愿意从广泛的源头中寻求和应用相关的知识。因此，这个特点一开始可能会吓到一些学生，但它能够为个人的个性化发展和职业素养深造提供巨大的好处。

今天，几乎所有的机械装置都包括电子组件和某种类型的计算机监测或控制模块。因此，术语机电一体化系统包括各种各样的装置和系统。越来越多的微控制器嵌入在机电设备中，这给系统设计带来了更多的灵活性和控制的可能性。机电一体化系统的例子包括飞行器的飞行控制和导航系统、汽车气囊安全系统和防抱死制动系统、自动化制造设备[诸如机器人和数控(NC)机床等]以及智能厨房和家用电器(如面包机和洗衣机，甚至还包括玩具)。

图1-1说明了典型机电一体化系统中的所有组件。执行器产生运动或引起一些动作；传

感器检测系统参数、输入和输出；数字装置控制着系统；调理和接口电路提供控制电路和输入/输出设备之间的连接；图形显示器向用户提供视觉反馈。随后的章节介绍了此框图中列出的组件，并解释了其分析和设计的各个方面。图 1-1 所示的各个组件在每章的开头都进行了强调，这将有助于你在逐渐增加设计机电一体化系统的能力时，更好地认识到每个组件的重要性。网络链接 1.2 为研究和购买不同类型的机电一体化组件提供了各种供应商和信息来源。

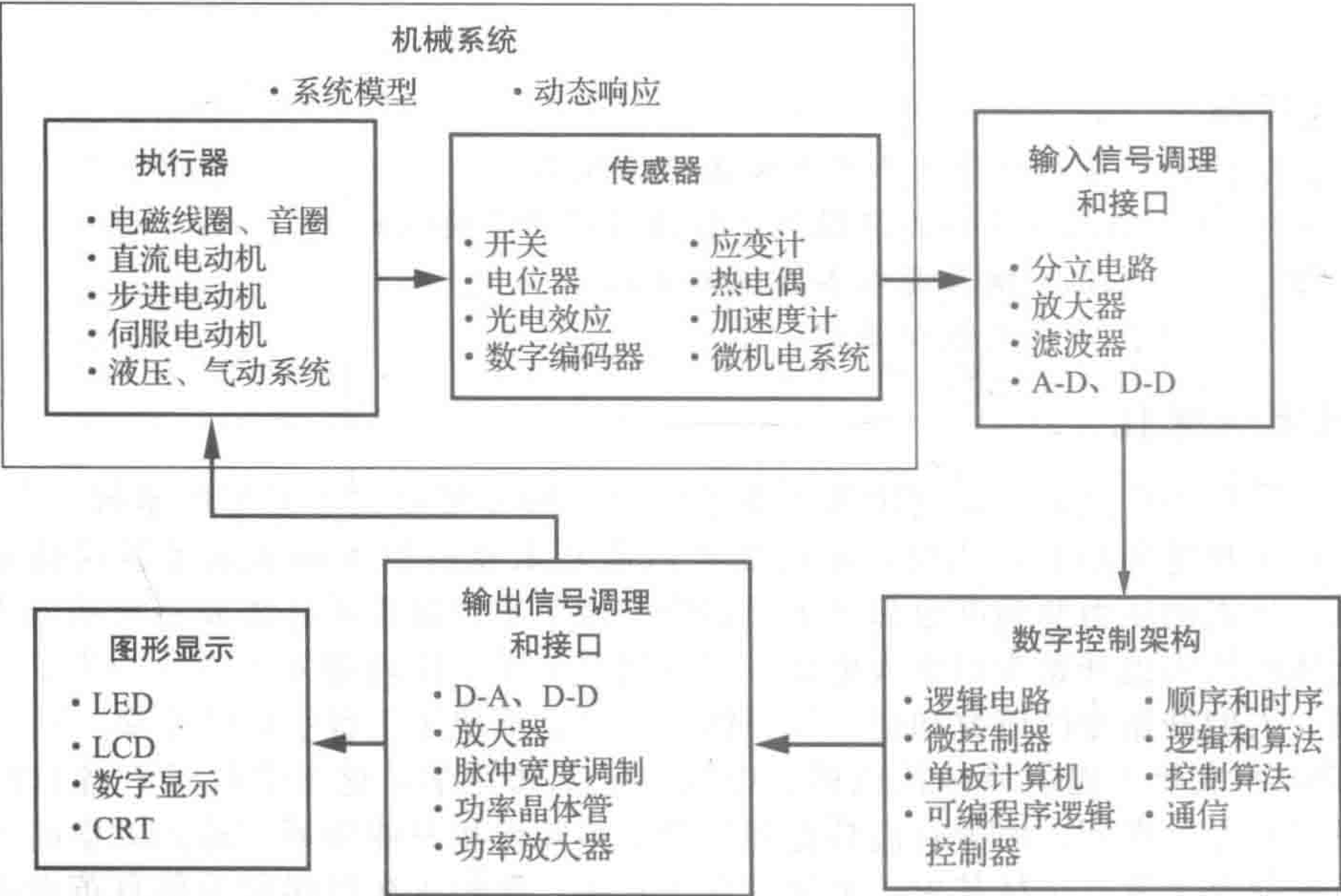


图 1-1　机电一体化系统的组件

例 1.1 描述了一个机电一体化系统的例子——办公复印机。图 1-1 所示的所有组件都可以在这个通用的办公设备中找到。其他机电一体化系统的例子可以在书中所给的网站上找到。在网络链接 1.3 中可以看到电动滑板车的实例，视频演示 1.1 和 1.2 给出了 Adep

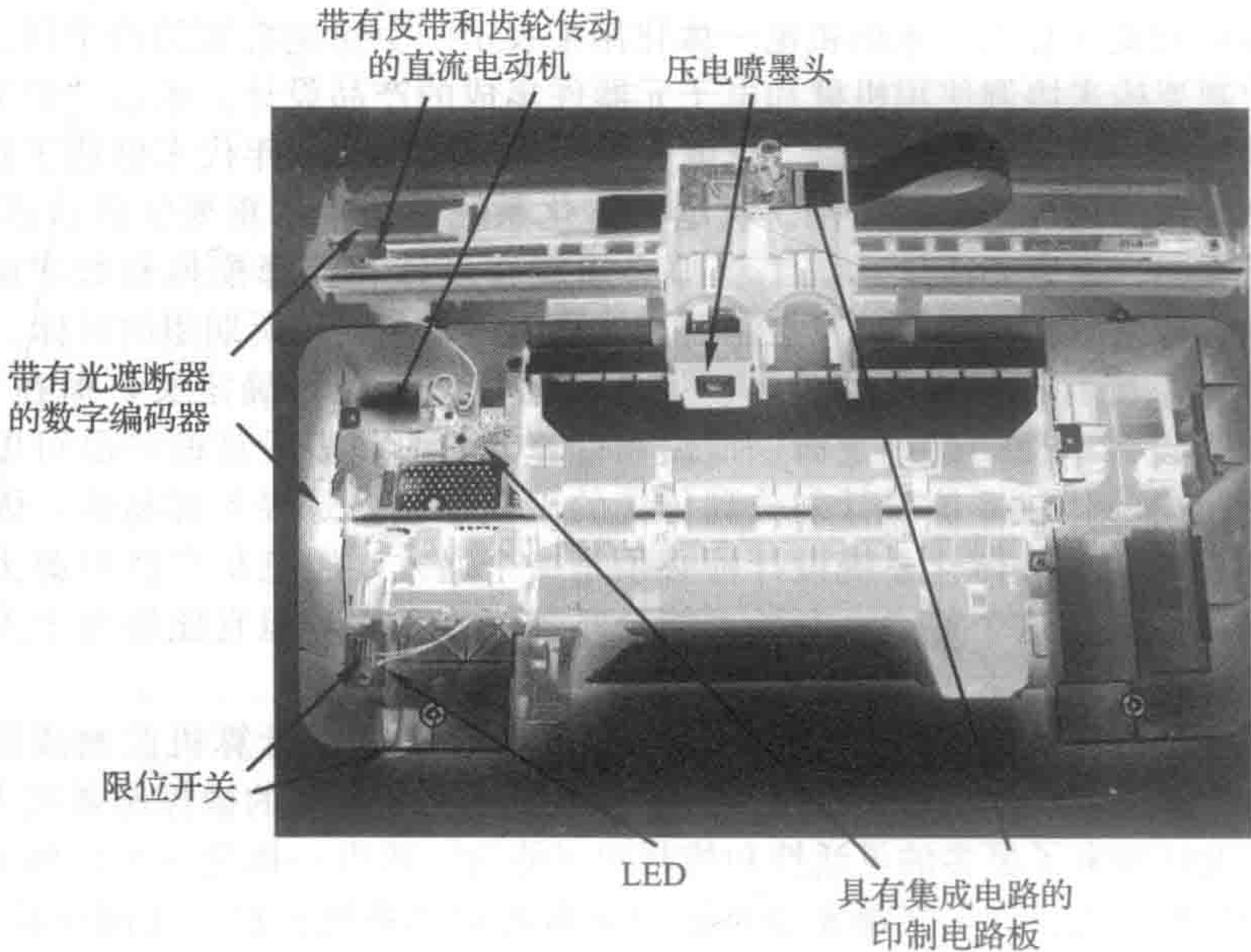


图 1-2　喷墨打印机组件

工业机器人，视频演示 1.3 和 1.4 列举了本田 Asimo 和索尼 Qrio 仿人机器人，视频演示 1.5 给出了喷墨打印机。与例 1.1 中的复印机一样，这些机器人和打印机包含了图 1-1 所示的所有的机电一体化系统组件。图 1-2 中标注出了视频演示 1.5 中的机电一体化系统组件。更多的机器人相关设备的视频演示可以通过网络链接 1.4 获得，其他机电一体化系统实例可以在网络链接 1.5 上找到。

例 1.1　机电一体化系统——复印机

办公室复印机是现代机电一体化系统的一个典型实例。它包括模拟和数字电路、传感器、执行器和微处理器。复印过程的工作原理如下：用户将原件放入装载器中并按下启动按钮，原件运送到平板玻璃，此时高强度光源扫描原件，并将相应的图像以电荷分布的形式传送到硒鼓上。接着，从加载盒中取出一张白纸，且将图像通过静电沉积将墨粉转印到纸上并加热墨粉使其融化而定影。然后排序机构有选择地将复印件传递到适当的纸盒中。

模拟电路控制机器中的灯、加热器和其他功率电路。数字电路控制数字显示、指示灯、按钮和由开关构成的人机界面。其他数字电路包括逻辑电路和微处理器，用于协调复印机的所有功能。光学传感器和微型开关用于检测纸张的状态，如是否缺纸、位置是否合适，以及复印机舱门和闩锁是否处于正确位置。其他传感器包括用于跟踪电动机旋转的编码器。执行器包括伺服和步进电动机，它们的主要功能是实现复印纸的装载和输送、转动硒鼓并对分拣机进行索引。

课堂讨论项目 1.1　家用机电一体化系统

哪种典型的家庭用品可以称为机电一体化系统？它们包含的哪些组件可以帮助你将它们识别为机电一体化系统？如果其包含微处理器，请描述微处理器用于实现哪些功能。

1.2　测量系统

许多机电一体化系统的基本部分都是由图 1-3 所示的 3 个基本模块组成的**测量系统**。**变送器**是将被测的物理输入转换为输出的感知装置，输出通常是电压。**信号处理器**对变送器输出的信号进行滤波、放大或其他处理。术语**传感器**通常指变送器或变送器和信号处理器的组合。最后，**记录仪**是一种仪器，如计算机、硬拷贝设备、仅仅是维持用于在线监测或后续处理传感器数据的显示器。

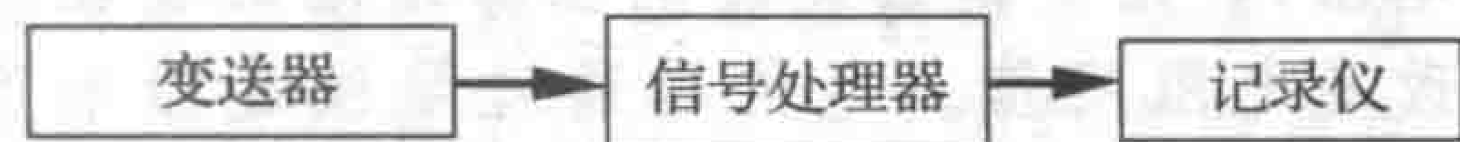


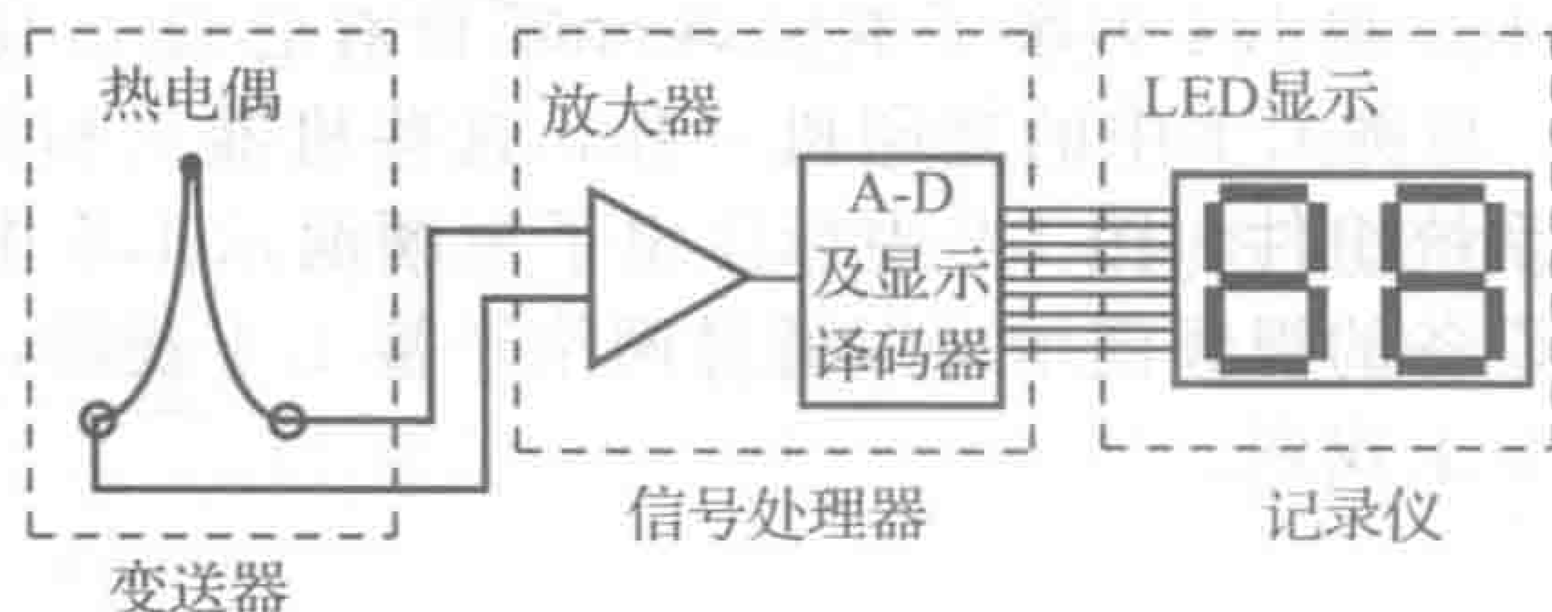
图 1-3　测量系统的组成

测量系统的这 3 个模块的类型很多，其成本和性能也各不相同。对于测量系统的设计者和用户来说，重要的是通过使用和了解它们的特性和局限性之后，为当前测试任务选择最合适的元器件。除了作为大多数机电一体化系统的组成部分之外，测量系统通常用作在实验室或现场环境中采集数据的独立设备。

附录 A 提供了对测量系统和分析很重要的补充信息，包括有关物理量的单位、数值精度和统计等，可以根据需要查询。

例 1.2　测量系统——数字温度计

下图显示了一个测量系统的实例。热电偶是将温度转换为微小电压的变送器，放大器的作用是对电压幅值进行放大，A-D(模拟-数字)转换器是将模拟信号转换为编码数字信号的装置，LED(发光二极管)显示温度值。



1.3　渐进设计实例

在本书中列举了用于基本分析计算的实例和讲解了如何选择和整合元器件和子系统的设计实例。还有3个更复杂的贯穿全书的渐进设计实例，每次涉及这些设计实例时，都会引入一个新的主题，直至最终构建出一个完整的机电一体化系统，这些系统采用各种方式控制不同类型电动机的位置和速度。渐进设计实例A.1、B.1和C.1分别介绍了各个实例的内容。这3个设计都包含了机电一体化系统中重要的组件：微控制器、输入设备、输出设备、传感器、执行器以及电子元器件和软件。请阅读以下信息并观看介绍视频。当给出渐进设计实例的每一个新主题时，建议再次观看视频，了解设计实例的每一个组件是如何连接进而构成一个完整大系统的。

用于构建3种渐进设计系统的所有组件在网络链接1.6中列出，并给出了相应的描述和价格信息。大多数元器件是通过两个在线电子元器件供应商Digikey公司(见网络链接1.7)和Jameco电子公司(见网络链接1.8)购买的。通过在供应商网站上输入网络链接1.6给出的元器件型号，可以访问每个产品的技术数据手册。

渐进设计实例 A.1　直流电动机功率运算放大器速度控制器——简介

本设计实例是关于直流(DC)永磁电动机的旋转速度控制的。图1-4说明了系统中的主要元器件和元器件间的连接。发光二极管(LED)为用户提供微控制器正常运行的可视化提示。速度输入装置是电位器(即可变电阻)，用户通过旋转电位器顶端的旋钮来改变电阻阻值。电位器通过导线连接来产生电压输入。此电压信号连接到微控制器上(通常是单个集成电路上的小型计算机)用以控制直流电动机的旋转，电动机旋转速度与电压成比例。电压信号是“模拟”信号，但微控制器是“数字”器件，因此需要模-数(A-D)和数-模(D-A)转换器来实现模拟器件和数字器件之间的互连。最后，因为电动机可能需要较大的电流，所以需要一个功率放大器来提高电压和提供必要的电流。视频演示1.6演示了图1-5所示的完整工作系统。

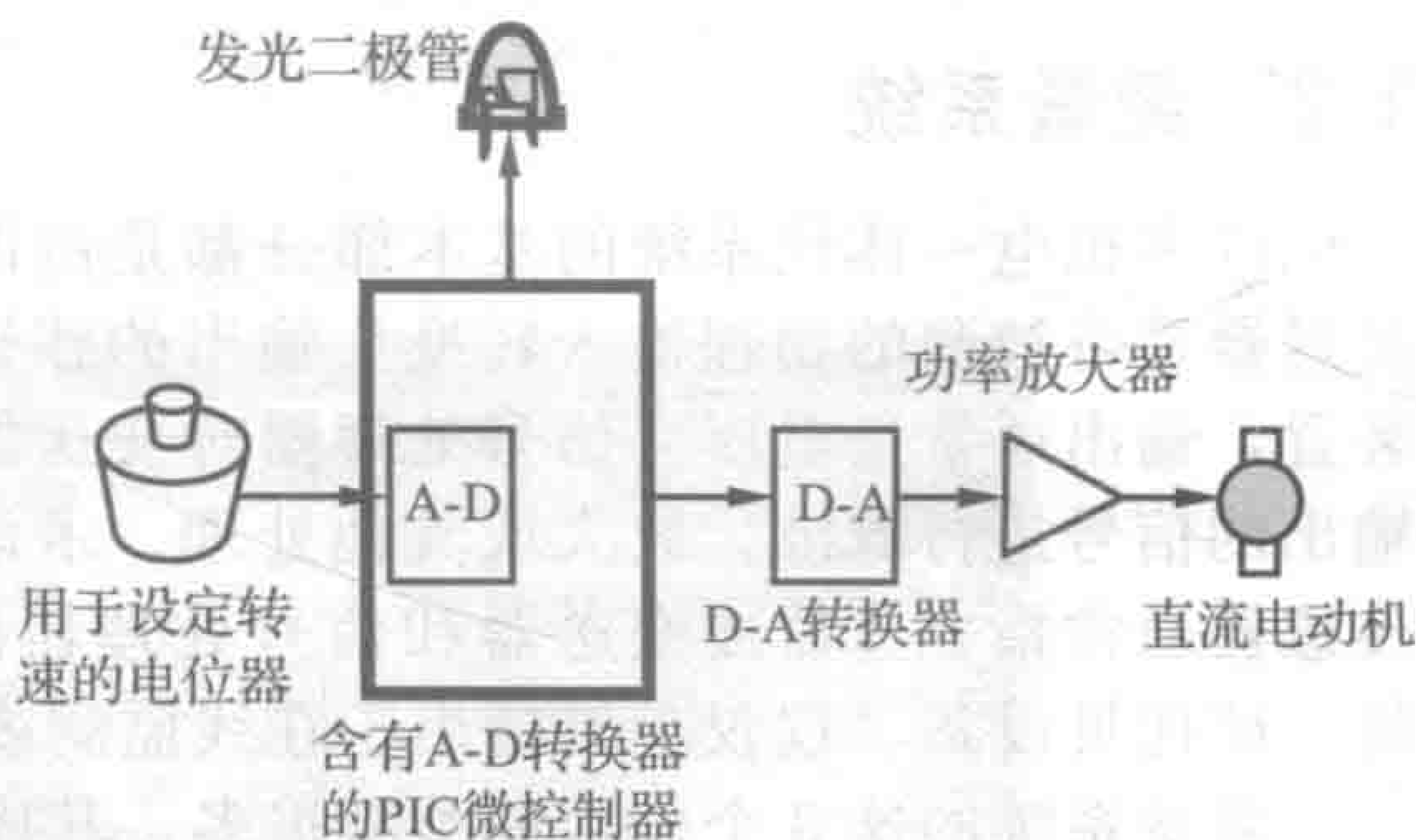


图1-4　直流电动机速度控制器的原理图

随着所有3个渐进设计实例(A、B和C)的逐步深入，按顺序来浏览本书的各章节将更全面地了解设计中的组件。

注意在本实例中PIC微控制器(带A-D转换器)和外部D-A转换器其实并不需要。将电位器的电压输出直接连接到功率放大器可实现相同的功能。包含了PIC(带A-D转换器)和D-A转换器组件的原因是为了说明在模拟系统中如何连接这些组件(这在许多应用中是有用的)。此外，可以在此设计基础上进行进一步的开发，其中PIC可在更复杂的设计中

实现反馈控制和用户界面。可能需要微控制器的实例如机器人或数控铣床和车床，其中电动机通常需要跟随相当复杂的运动轨迹来响应来自传感器、用户编程或手动输入的信号。

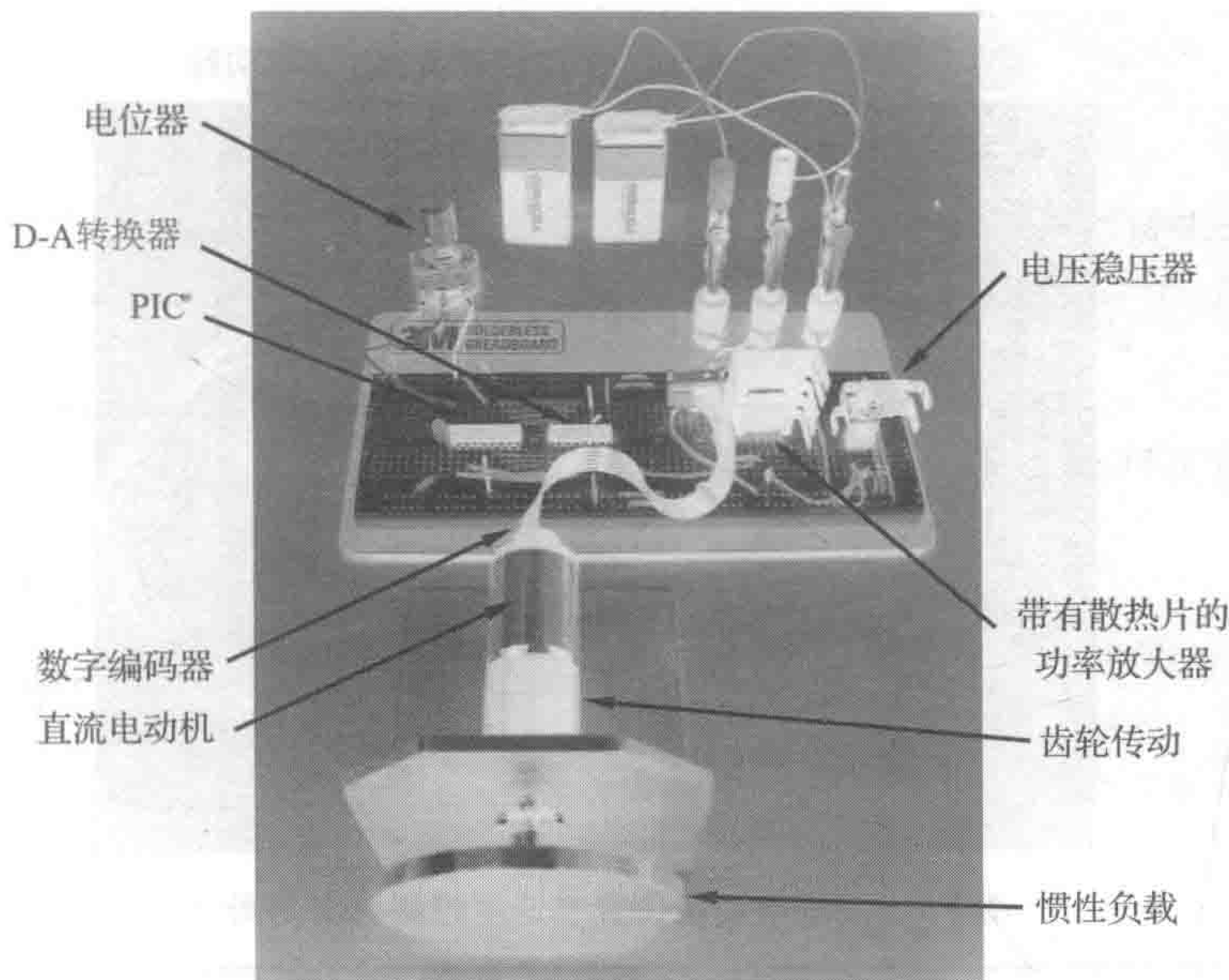


图 1-5 功率放大速度控制器的实物图

渐进设计实例 B.1 步进电动机位置和速度控制器——简介

该设计实例是关于步进电动机的位置和速度控制的，步进电动机以离散的角增量形式移动，常用在位置控制中，将部件或工具移动到各种固定位置(如自动组装线或生产线)。步进电动机还可用于精确的速度控制(如控制计算机硬盘驱动器或DVD播放器的主轴速度)，步进电动机的速度与步进速率成正比。

图 1-6 显示了系统中的主要元器件及其连接。输入装置包括用于手动控制速度的电位器，用于选择预定位置的4个按钮，以及用于在速度和位置控制之间切换的模式按钮。在位置控制模式中，4个位置按钮中的每一个都能将电动机指向相对于起始点的特定的角度位置(0°、45°、90°、180°)。在速度控制模式下，顺时针(逆时针)转动电位器会增加(减小)速度。LED为用户提供微控制器正常运行的可视化提示。与渐进设计实例 A.1 一样，A-D转换器是将电位器的电压转换为数字值，然后微控制器利用该值来产生用于步进电动机驱动器电路的信号，使得电动机旋转。

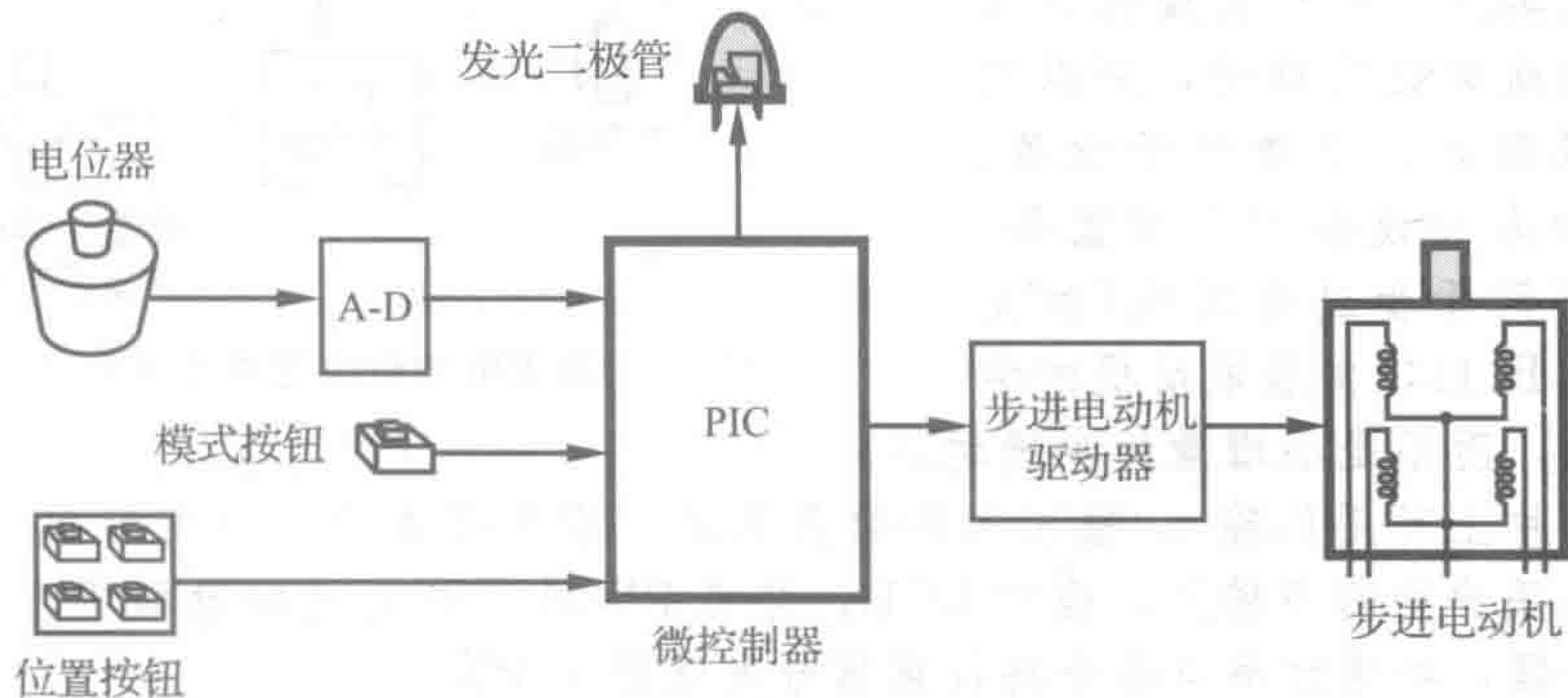


图 1-6 步进电动机位置和速度控制原理图

视频演示 1.7 演示了图 1-7 所示的完整工作系统。通过对本书的深入学习，读者将了解本设计中的不同元器件。

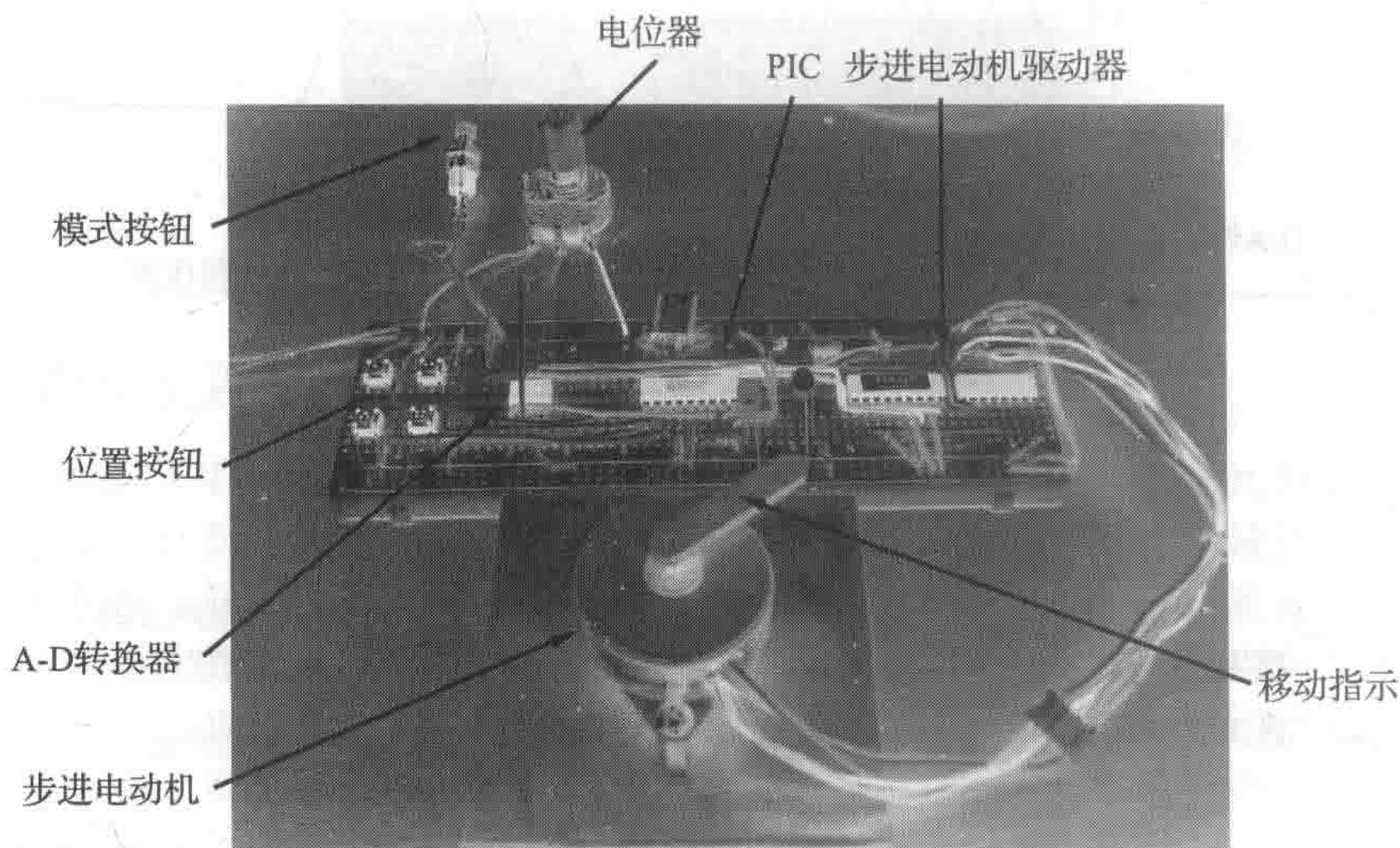


图 1-7 步进电动机位置和速度控制的实物图

渐进设计实例 C.1 直流电动机位置和速度控制——简介

该设计实例描述了永磁直流电动机的位置和速度控制。图 1-8 所示为系统中主要的元器件及其连接。数字键盘作为输入，液晶显示器(LCD)用于显示消息和菜单驱动的用户界面。电动机由 H 桥驱动，它允许施加到电动机上的电压(即旋转方向)反向。H 桥还允许通过脉冲宽度调制(PWM)实现电动机的转速控制。PWM 的原理是以不同的占空比快速地接通和关断电动机的电源，改变施加至电动机的平均有效电压值。

连接到电动机轴上的数字编码器提供位置反馈信号，该信号用于调节电动机的电压信号，从而实现电动机位置或速度的控制。因为我们使用传感器的反馈信号来控制电动机，所以这一整体也称为伺服电动机系统。伺服电动机可以实现某些机构或部件以特定速度精确地定位或移动，所以它在自动化、机器人、消费电子设备、流量控制阀和办公设备中非常重要。伺服电动机不同于步进电动机(参见渐进设计实例 B.1)，伺服电动机的运动是平滑运动，而不是小增量的步进运动。

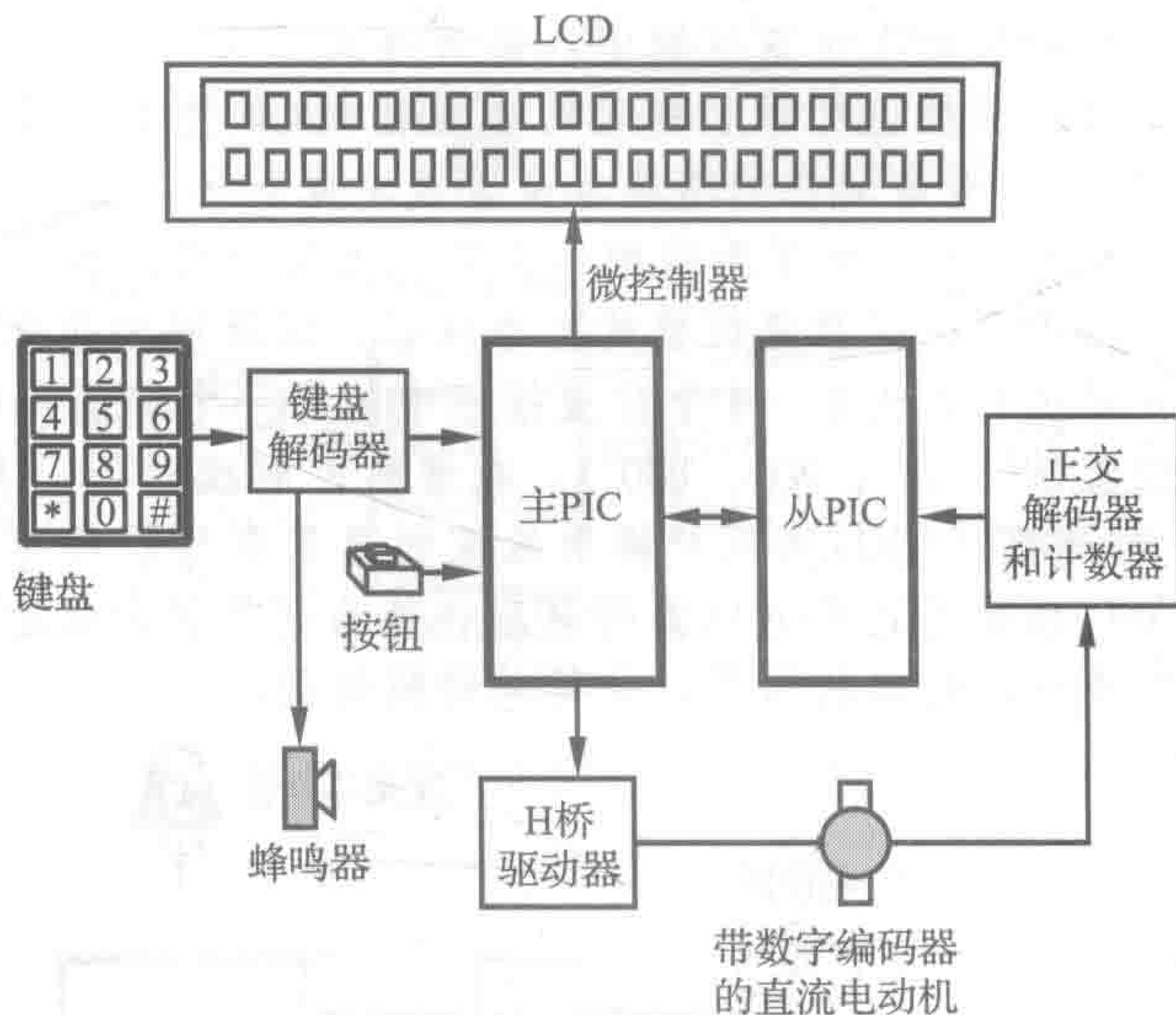


图 1-8 直流电动机位置和速度控制的原理图

在单个芯片上可用的输入/输出引脚数量有限，因此在本设计中使用两个 PIC 微控制器。主 PIC 从用户处获得输入，驱动 LCD，并将 PWM 信号发送给电动机。辅助(从)PIC 监视数字编码器，并通过串口命令将位置信号发送回主 PIC。

视频演示 1.8 演示了图 1-9 所示的完整工作系统。通过对本书的深入学习，读者将了

解本设计中的每个元器件。

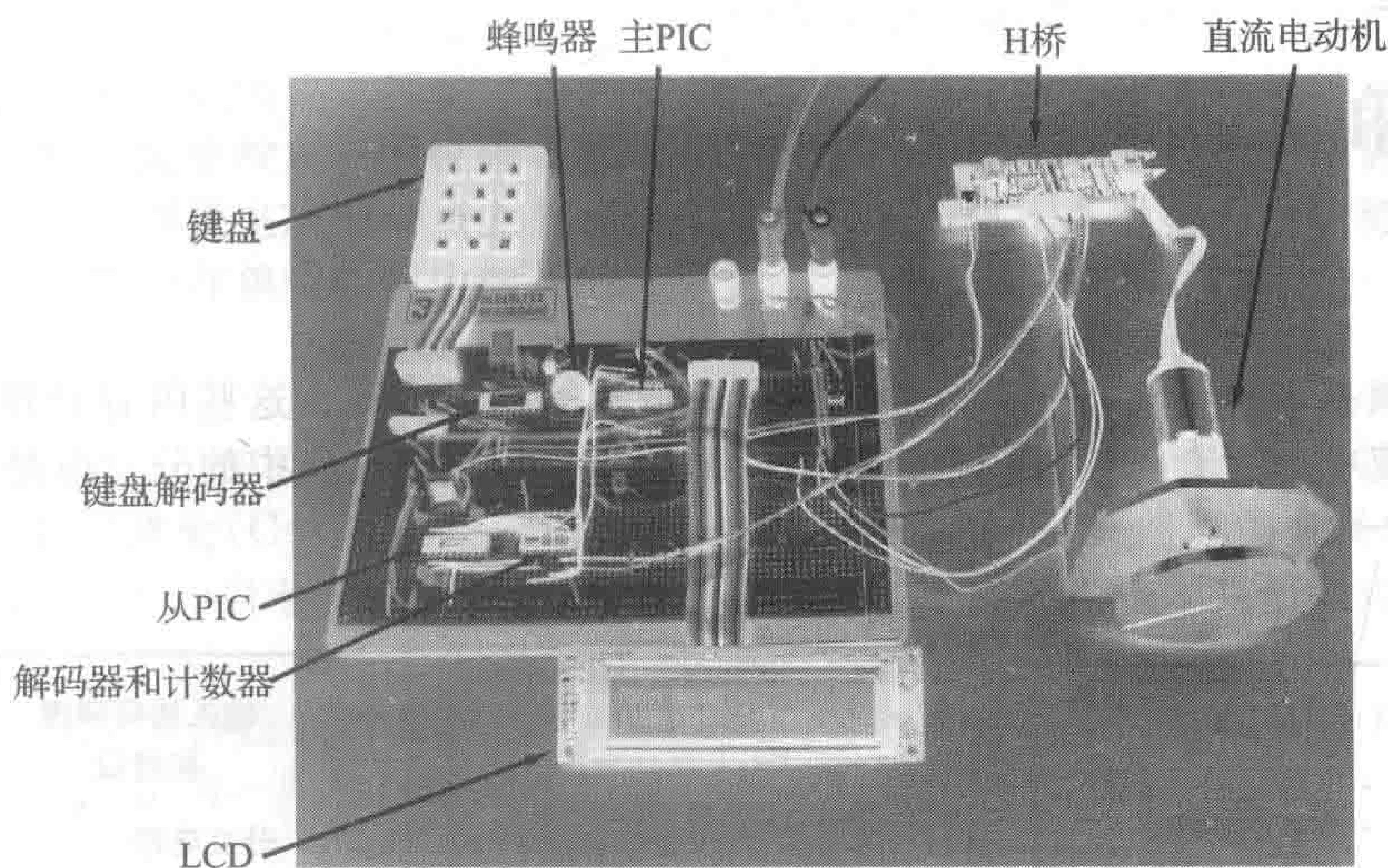


图 1-9 直流电动机位置和速度控制的实物图

参考文献

Alciatore, D. and Histand, M., "Mechatronics at Colorado State University," *Journal of Mechatronics,* Mechatronics Education in the United States issue, Pergamon Press, May, 1995.

Alciatore, D. and Histand, M., "Mechatronics and Measurement Systems Course at Colorado State University," *Proceedings of the Workshop on Mechatronics Education,* pp. 7–11, Stanford, CA, July, 1994.

Ashley, S., "Getting a Hold on Mechatronics," *Mechanical Engineering,* pp. 60–63, ASME, New York, May, 1997.

Beckwith, T., Marangoni, R., and Lienhard, J., *Mechanical Measurements,* Addison-Wesley, Reading, MA, 1993.

Craig, K., "Mechatronics System Design at Rensselaer," *Proceedings of the Workshop on Mechatronics Education,* pp. 24–27, Stanford, CA, July, 1994.

Doeblin, E., *Measurement Systems Applications and Design,* 4th edition, McGraw-Hill, New York, 1990.

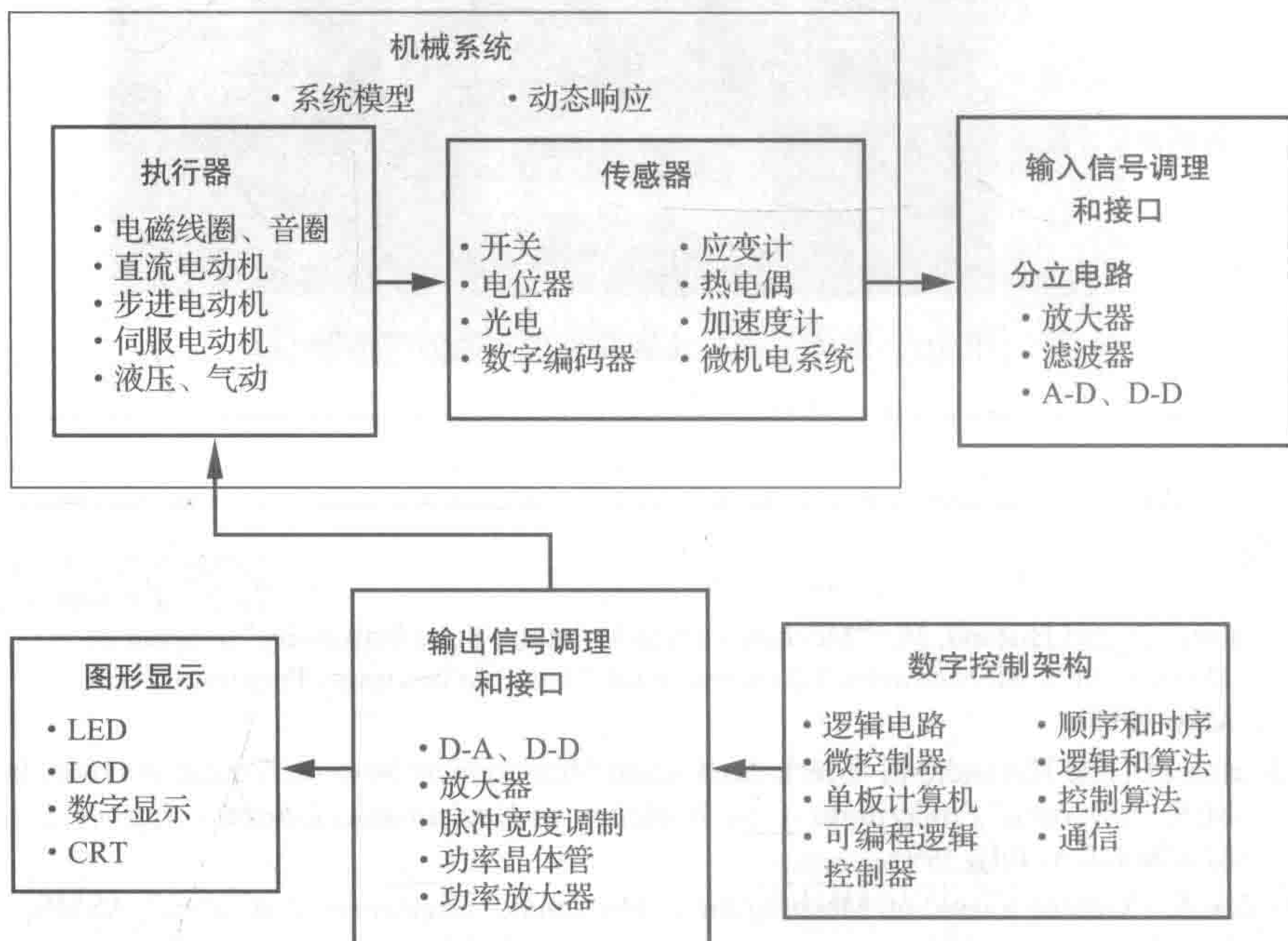
Morley, D., "Mechatronics Explained," *Manufacturing Systems,* p. 104, November, 1996.

Shoureshi, R. and Meckl, P., "Teaching MEs to Use Microprocessors," *Mechanical Engineering,* v. 166, n. 4, pp. 71–74, April, 1994.

第2章

电路和元器件

本章回顾基本电气元器件和分立电路分析技术的基本原理。这些内容对理解和设计机电一体化系统中的所有元器件非常重要，特别是信号调理和接口中的分立电路。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 了解电阻、电容和电感之间的差异；
2. 掌握基尔霍夫的电压和电流定律，并将其应用于包含电阻器、电容器、电感器、电压源和电流源的无源电路中；
3. 知道如何应用理想电压源和电流源模型；
4. 能够预测在正弦输入时电路的稳态行为；
5. 能够表征电路消耗或产生的功率；
6. 能够预测不匹配阻抗的影响；
7. 了解如何降低电路中的噪声和干扰；
8. 认识到注意电气安全和正确接地的重要性；
9. 了解一些实用的注意事项，这将能够组装实际电路，并使其正常和可靠工作；
10. 知道如何可靠地测量电压和电流。

2.1 引言

实际上所有机电和测量系统都包含电路和元器件。为了理解如何设计和分析这些系统，必须牢牢掌握基本电气元器件和电路分析技术的基本原理。这些知识对理解本书后面的其他内容至关重要。

电子的运动形成电流，其所携带的能量可以完成一些有用的功能。电子运动的原因是外加电场通过对其做功提供了能量，电场电位的度量称为**电压**，类似于重力场中的势能。可以将电压视为电场中两点之间的“跨越变量”。电子在电场中运动的结果是电流，它是“通过变量”。在电路中放置一个仪表，让电流流过它，这样可以测量流过电路的电流。当测量电压时，要在测量电压的两点上放置两个导电探头，电压有时称为**电动势**或 emf。

电流定义为电荷在单位时间内流动的速率：

$$I(t)=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{2-1}$$

其中，I 表示电流；q 表示电荷量。电量由带负电荷的电子提供，电流的国际单位是**安培**(A)，电量单位是**库仑**(C=A·s)。当电路中的电压和电流恒定(与时间无关)时，其值和电路称为**直流**或 DC。当电压和电流随时间变化时，通常是正弦波，其值和电路称为**交流**或 AC。

电路是由几个导体连接的电子元器件组成的闭合回路。导体可能被称为开关的元器件所中断。图 2-1 所示为一些电路的简单示例。

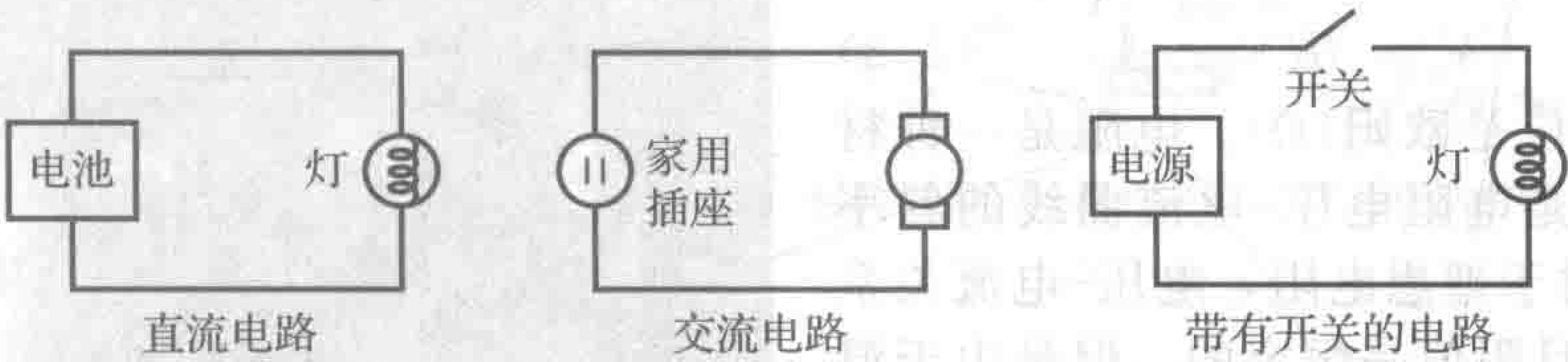


图 2-1　电路

在电路分析中使用的术语和电流约定如图 2-2a 所示。为电路提供能量的电压源可以是电源、电池或发电机。电压源将电能加到通过电路负极流到正极的电子上。正极吸引电子，负极释放电子。负极通常在电路示意图中不作标记(负号)，因为已用加号标记了正极。标准约定假设正电荷的流动方向与电子流动的方向相反，**电流**方向是正电荷(不是电子)移动的方向。该约定出自本杰明·富兰克林，他认为电流是正电荷粒子运动的结果。**负载**由消耗或存储电能的电路元器件网络组成。图 2-2b 显示了绘制电路原理图的两种方法。**地**是电路中假定电压为零的参考点，即使图 2-2b 上面所示的电路中没有给出两个地符号之间的连接，两个地符号仍然表示同一个参考电压(即公共地)，这样在绘制复杂电路时可以减少连接线的数量。图 2-2b 的底部电路是其等效表示。

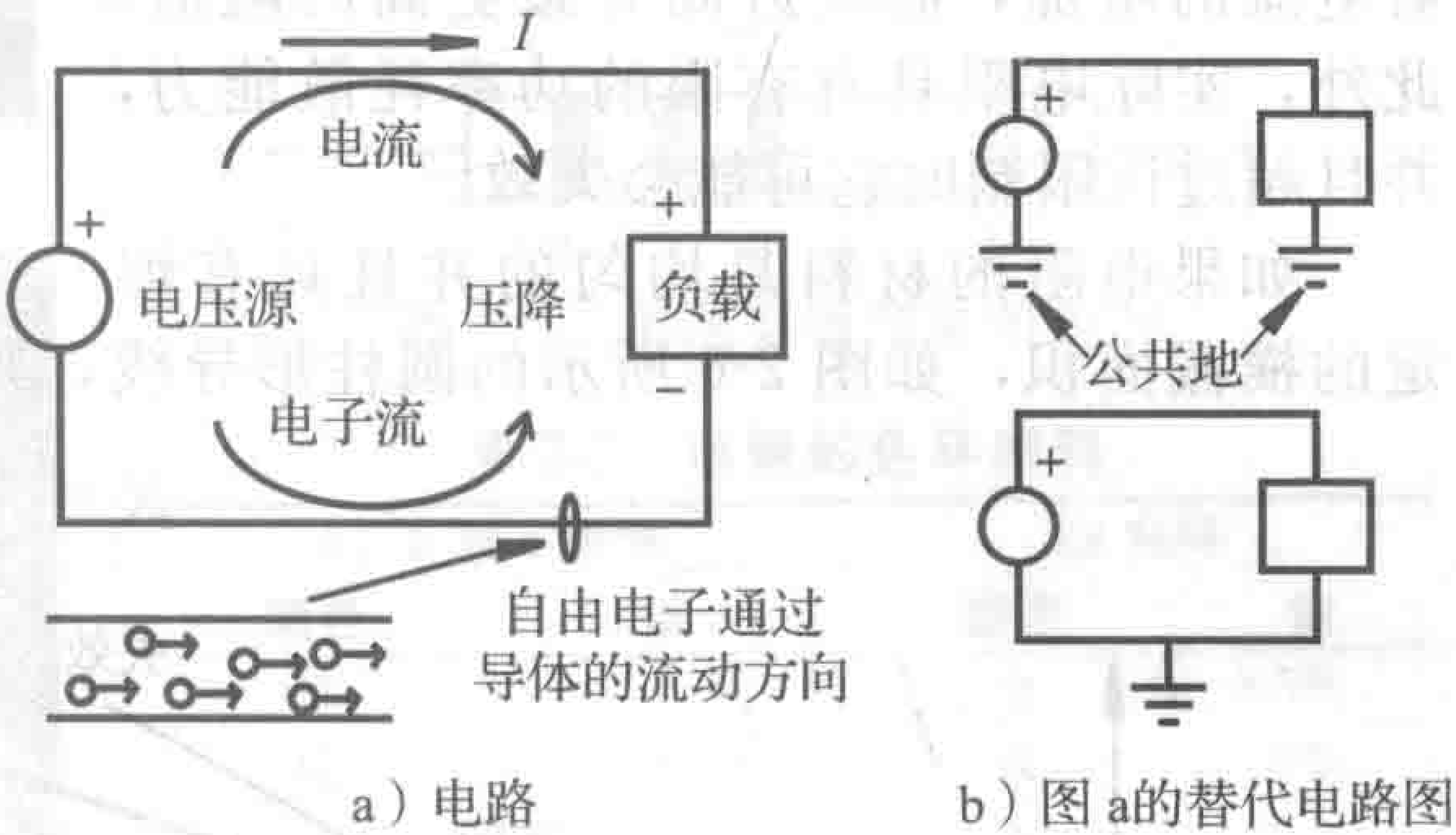


图 2-2　电路

课堂讨论项目 2.1　正确起动电池耗尽的汽车

当试图起动一个电池耗尽的汽车时，画出正确连接两节电池跨接电缆的等效电路图和列出需要做的步骤。确保正确标记每节电池的正极和负极端子以及跳线上红色和黑色电缆。

建议黑色跳线电缆和电池耗尽的车子之间的连接最后完成，应将黑色电缆连接到远离电池的汽车车架上，而不是将其连接到电池的负极上。这个建议的理由是什么？当汽车起动后，拆除连线的顺序重要吗？

注：本书中的许多课堂讨论项目(包括该项目)的提示和部分答案在网站 mechatronics. colostate. edu 上提供。

2.2 基本电气元件

有 3 个基本的无源电气元件：电阻(R)、电容(C)和电感(L)。无源元件不需要额外的电源，不像有源器件，如集成电路。无源元件由如下所述的电压-电流关系定义，它们在电路图中的符号如图 2-3 所示。

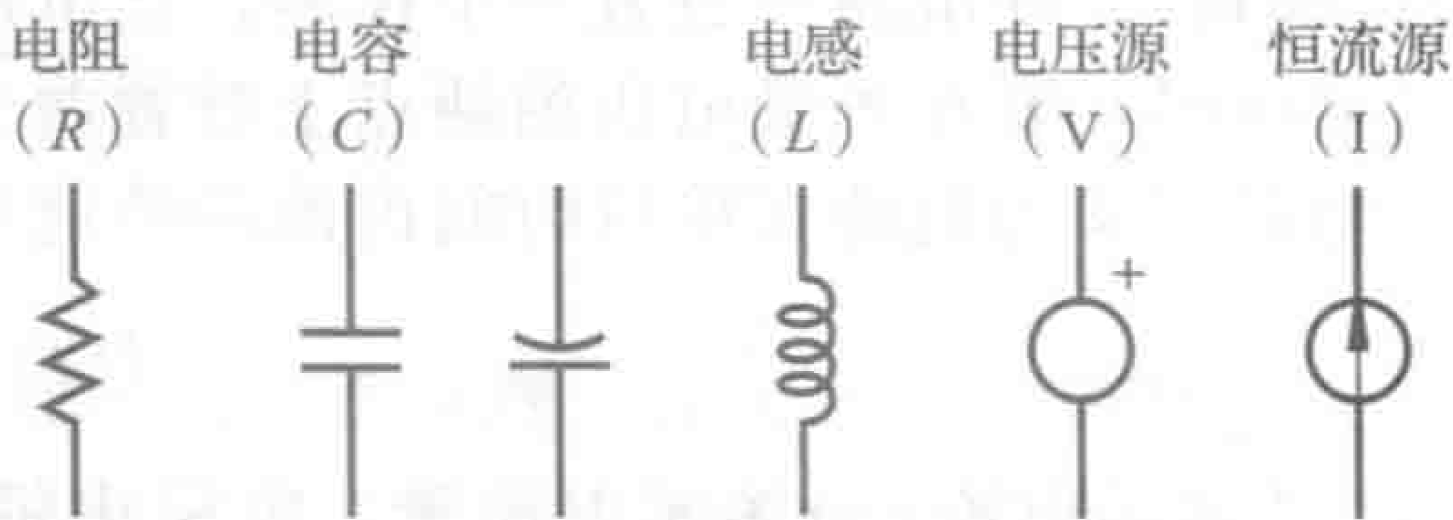


图 2-3 基本电子元件的原理图符号

理想电源有两种：**电压源**(V)和**电流源**(I)。这些理想的源没有内部电阻、电感或电容。图 2-3 还给出了理想源的电路图符号。图 2-4 显示了对应于图 2-3 所示符号的实物。

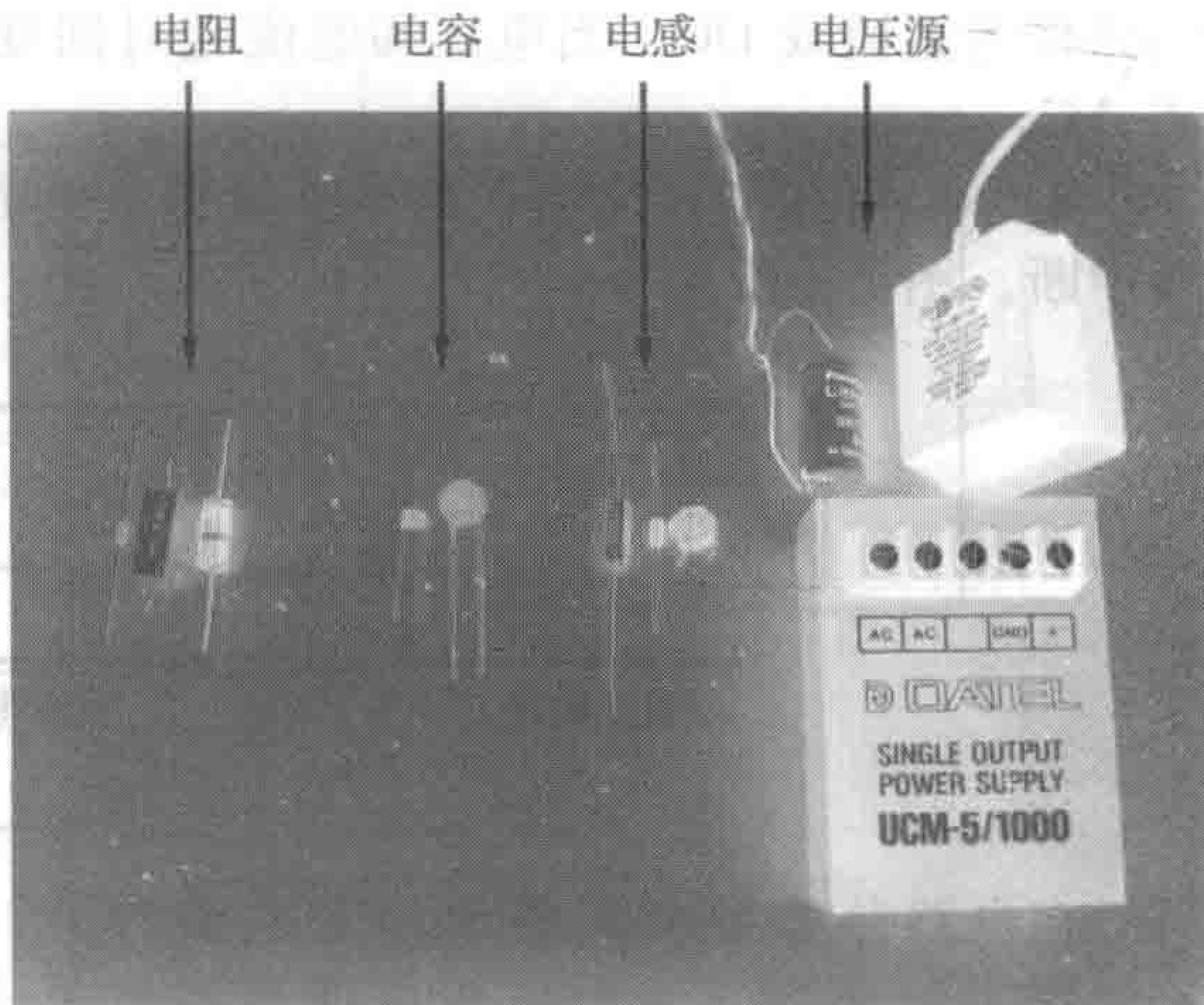


图 2-4 基本电子元器件的实物图

2.2.1 电阻

电阻是一种将电能转换成热能的耗散元件。**欧姆定律**定义了理想电阻的电压-电流特性：

$$V = IR \tag{2-2}$$

电阻的单位是**欧姆**(Ω)。电阻是一种材料特性，其值是电阻电压-电流曲线的斜率(见图 2-5)。对于理想电阻，电压-电流关系是线性的，并且阻值是恒定的。但是由于温度的影响，实际的电阻通常是非线性的。随着电流的增加，温度升高导致更高的阻值。此外，实际电阻具有有限的功率耗散能力，并且超过该限制时它可能会失效。

如果电阻的材料是均匀的并且具有恒定的横截面积，如图 2-6 所示的圆柱形导线，则电阻由下式给出：

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{2-3}$$

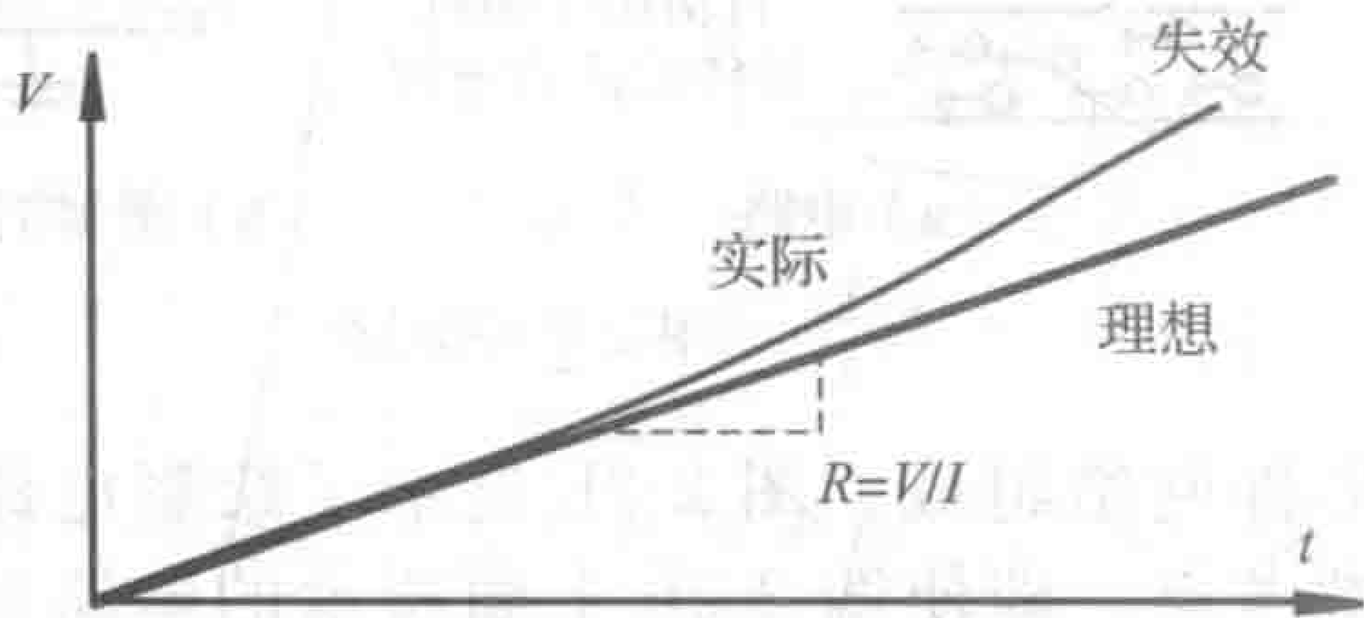


图 2-5 理想电阻的电压-电流关系

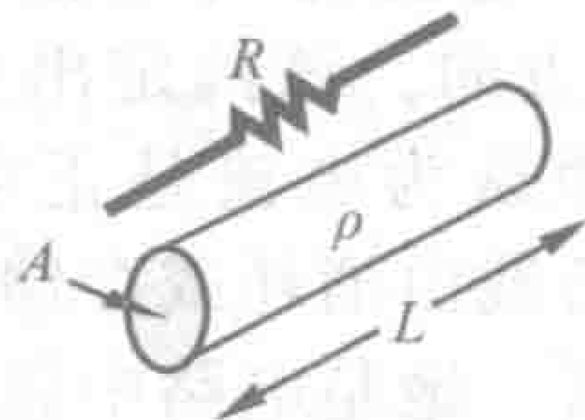


图 2-6 导线的电阻

表 2-1 一般导体的电阻率

材料	电阻率/10^{-8}Ω·m	材料	电阻率/10^{-8}Ω·m
铝	2.8	金	2.4
碳	4000	铁	10
铜镍合金	44	银	1.6
铜	1.7	钨	5.5

其中，ρ 是材料的**电阻率**；L 为导线长度；A 是横截面积。常见导体的电阻率见表 2-1，例 2.1 列举了在给定导线的直径和长度的情况下如何计算电阻。网络链接 2.1 和 2.2 列出了标准导体的直径和电流额定值。

例 2.1 导线电阻的计算

作为使用式(2-3)的示例，计算直径为1.0mm、长度为10m的铜线的电阻。

从表2-1可知，铜的电阻率

$$\rho = 1.7 \times 10^{-8}\Omega \cdot m$$

因为导线的直径、面积和长度分别为：

$$D = 0.0010m$$
$$A = \pi D^2/4 = 7.8 \times 10^{-7}m^2$$
$$L = 10m$$

所以导线的总电阻为：

$$R = \rho L/A = 0.22\Omega$$

连接电路时使用的实际电阻包括各种形式的封装：轴向引线器件、表面安装器件、**双列直插封装(DIP)**和**单列直插封装(SIP)**，其中DIP和SIP形式包含了多个电阻，它们可以方便地安装到电路板上。图2-7和图2-8给出了电阻的4种封装形式。视频演示2.1给出了电阻类型和封装的几个示例。

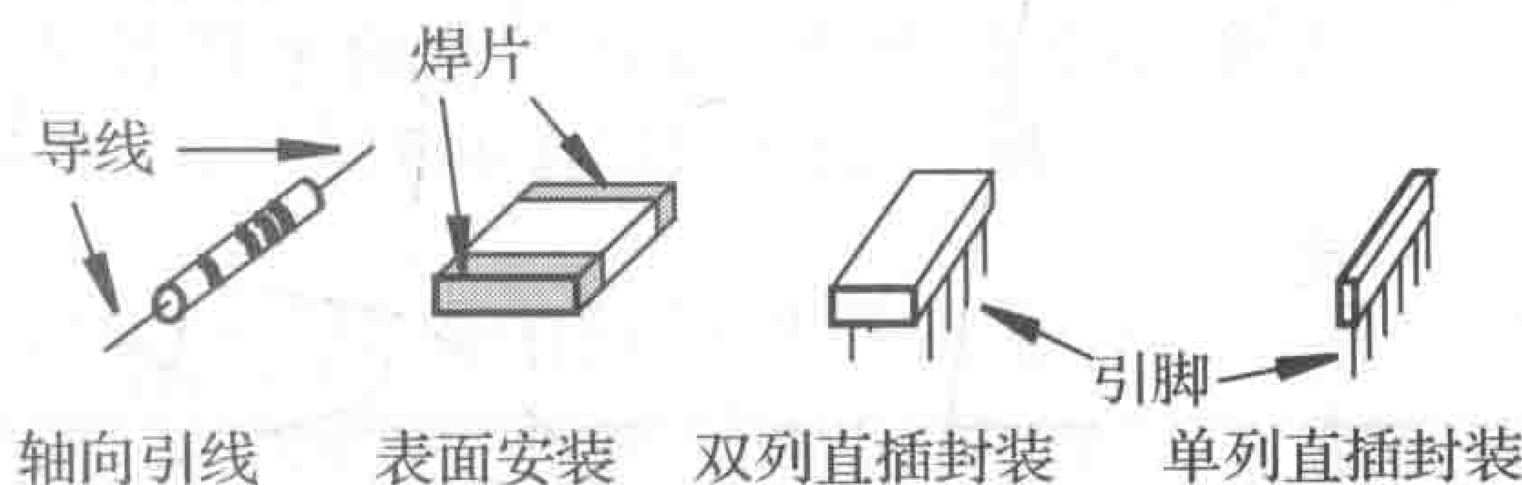


图2-7 电阻封装

轴向引线的电阻值和公差通常用4个彩色环来编码(a、b、c、tol)，如图2-9所示。在表2-2和网络链接2.3中列出了色环颜色对应的数值(方便参考)。

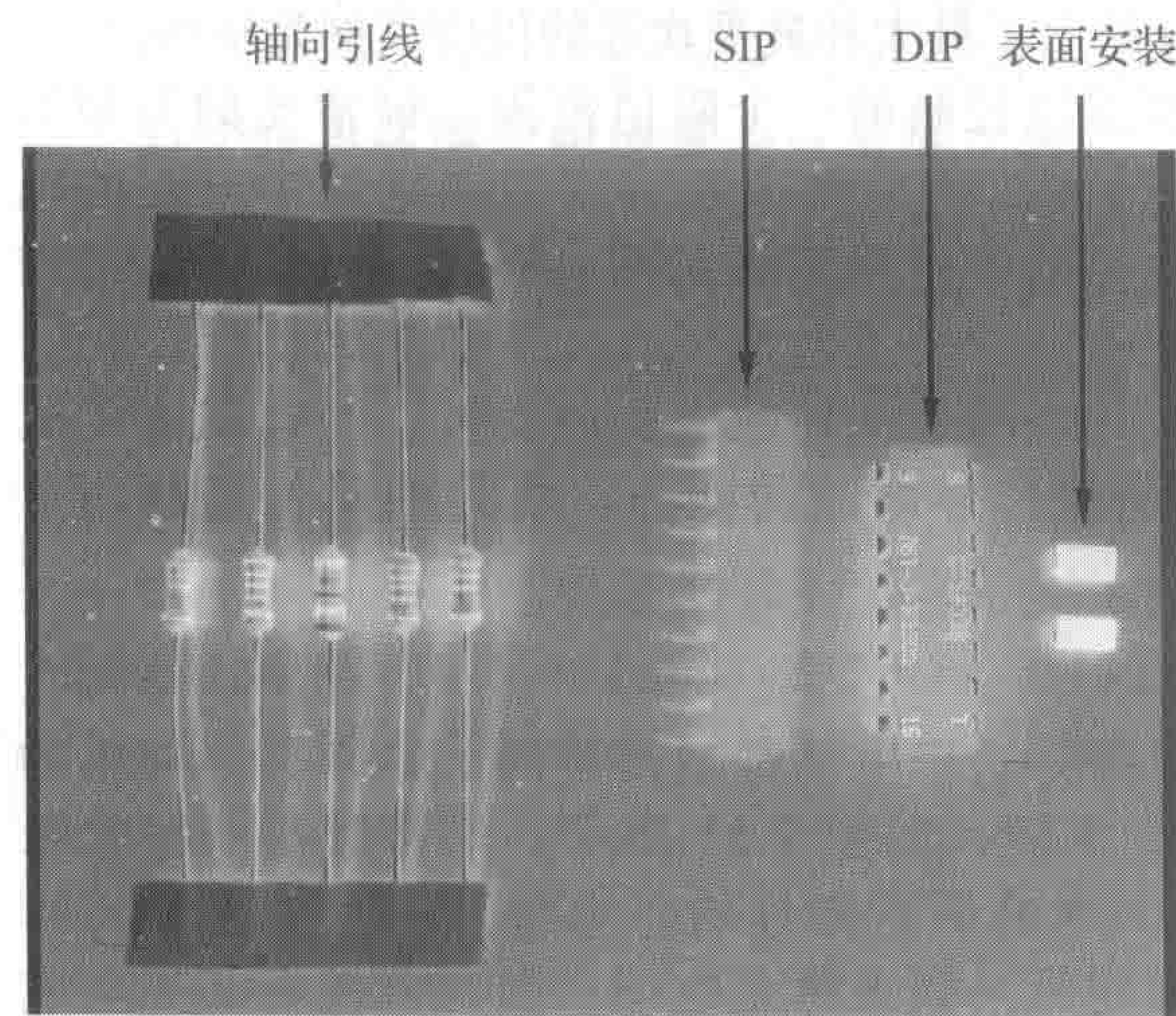


图2-8 几种电阻封装类型的实物

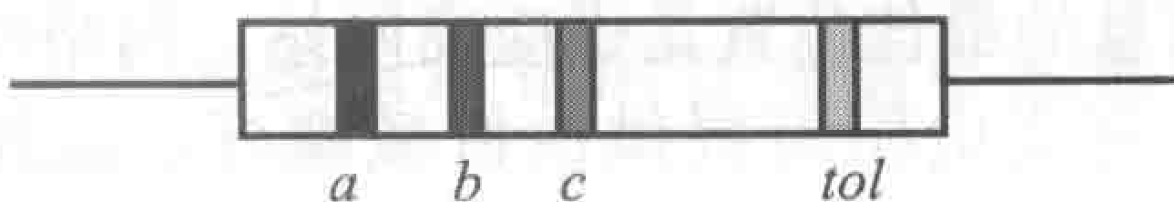


图2-9 轴向引线型电阻色环

表2-2 电阻的色环编码

a、b和c色环		tol色环	
颜色	值	颜色	值
黑	0	金	±5%
棕	1	银	±10%
红	2	无	±20%
橙	3		
黄	4		
绿	5		
蓝	6		
紫	7		
灰	8		
白	9		

电阻值及其容差(允许误差)表示为：

$$R = ab \times 10^c \pm \text{tolerance}(\%) \tag{2-4}$$

其中，色环a表示十位数；色环b表示个位；色环c表示10的幂；色环tol表示电阻值的百分比容差或不确定性。当手边没有表2-2所示的表格时，可以通过一句话来记住电阻的颜色代码，如："Bob BROWN Ran Over YELLOW Grass，But VIOLET Got Wet"。此句中每个单词的首写字母表示颜色：黑色(B)、棕色(B)、红色(R)、橙色(O)、黄色(Y)、绿色(G)、蓝色(B)、紫色(V)、灰色(G)和白色(W)。前两位数字(ab)的**标准值**集合为：10、11、12、13、14、15、16、18、20、22、24、27、30、33、36、39、43、47、51、

56、62、68、75、82 和 91。当电阻值在千欧范围内时，通常单位会简化成 k 而不用 kΩ，例如，电气原理图上电阻旁边的 10k 表示 10kΩ。

在普通电子电路中最常见的电阻是 1/4W，5%容差的碳或金属膜电阻。这种类型的电阻值范围在 1Ω～24MΩ 之间，也有更高额定功率的电阻。1/4W 的额定功率意味着如果消耗的功率超出该值，则电阻可能会失效。

精密金属膜电阻具有 1%或更小的不确定性，并且比低容差电阻的阻值范围更宽，其阻值通常用 4 位数码直接印刷在电阻体上。前三个数字表示电阻值，最后一个数字表示乘以 10 的幂次。

例 2.2　　**电阻的颜色代码**

轴向引线型电阻具有以下色环：

$$a = \text{绿},\quad b = \text{棕},\quad c = \text{红},\quad tol = \text{金}$$

根据式(2-4)和表 2-2，可能的电阻值范围是

$$R = 51 \times 10^2\,\Omega \pm 5\% \times 51 \times 10^2\,\Omega = 5100\Omega \pm (0.05 \times 5100)\Omega$$

或

$$4800\Omega < R < 5300\Omega$$

电阻有各种形状和大小。与许多电气元器件一样，其尺寸通常与其特性值(电阻)没有关系。电容是一个例外，较大的尺寸通常意味着较高的电容值。对于大多数通过连续电流的元器件，物理尺寸通常与最大电流或额定功率相关，这两者都与功耗有关。

为了说明这一原理，视频演示 2.2 显示了各种尺寸不同类型的元器件。查找各种元器件详细信息的最佳位置是供应商网站。网络链接 2.4 给出了最大和最受欢迎的供应商网站链接。

可变电阻可提供由机械螺杆、旋钮或线性滑轨控制的一个阻值范围。最常见的类型为**电位器**。电位器的各种原理图符号如图 2-10 所示。在电路中调节或微调电路中电阻的电位器称为微调电位器，其符号旁边通常有一个小的符号用于表示调节螺丝。电位器阻值增加的旋转方向通常在符号上会标出。关于电位器的进一步讨论见 4.8 节和 9.2.2 节。

电阻的倒数称为**电导**，有时也用来作为替代电阻表征耗散电路的元件。与电阻表示阻碍电流导通能力的不同，电导用来度量一个元件传导电流的能力，电导的单位是西门子(S=1/Ω=mho)。

2.2.2　电容

电容是一种以电场形式存储能量的无源元件，这个电场是电荷分离的结果。最简单的电容是一对由电介质材料隔开的平行导电板组成的，如图 2-11 所示。**电介质**是一种绝缘体，通过材料中的永久或感应电偶极子来增大电容。严格地说，电容隔断了直流(DC)，相反，电荷从电容器的一侧通过导电电路转移到另一侧来建立电场。因为电流在其充电或放电时流过元器件，所以电荷的位移称为**位移电流**。电容器的电压-电流关系定义为

$$V(t) = \frac{1}{C}\int_0^t I(\tau)\,\mathrm{d}\tau = \frac{q(t)}{C} \tag{2-5}$$

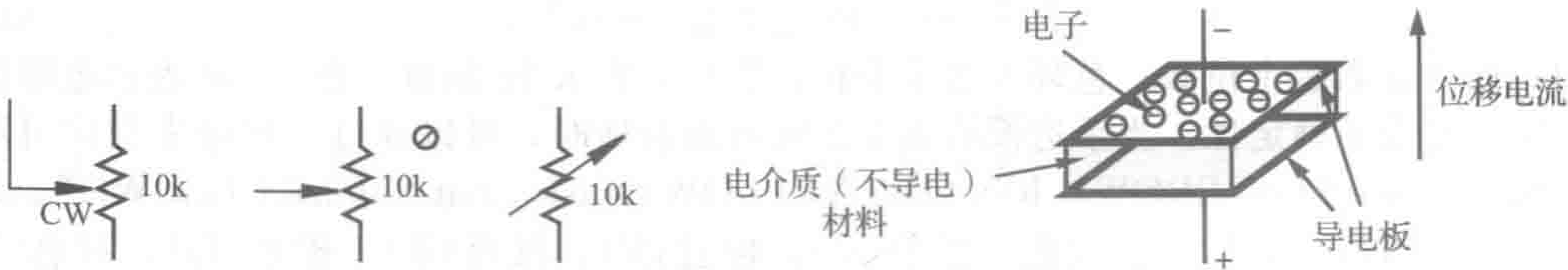


图 2-10　电位器的原理图符号　　　　图 2-11　平板电容器

其中，$q(t)$是累积电荷量，单位是库仑；电容的单位为法拉(法拉=库仑/伏特)。对

式(2-5)取微分，可以得到位移电流与电压变化率的关系：

$$I(t)=C\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \tag{2-6}$$

电容值由电介质和极板的几何形状及其距离确定。典型的电容值范围从 1pF～1000μF，也有更大的值。因为电容上的电压是位移电流的积分[见式(2-5)]，所以电压不能瞬间改变。在本书中将会数次看到用该特性实现电路定时，其电路为一个简单的电阻和电容相串联的 RC 电路。

商用电容器的主要类型有电解电容、钽电容、瓷片电容和聚酯薄膜电容。电解电容器是有极性的，这意味着它们具有正极和负极。极性电容的正极引线必须连接到比负极更高的电压上，否则，元件将会损坏(可能会短路或随着爆裂声而爆炸)。电容器有许多尺寸和形状(见视频演示 2.3)。通常，电容值通常以 μF 或 pF 直接印在元件上，但有时也使用三位数码。前两个数字是电容值，第三个是乘以 10 的幂次，单位为 pF(例如，102 表示10×10^2pF=1nF)。如果只有两个数字，其值则以 pF 为单位(例如，22 代表 22pF)。更多信息参见 2.10.1 节。

2.2.3 电感

电感是一种以磁场形式存储能量的无源储能元件。电感的最简单形式是一个线圈，其一旦形成磁场就有保持磁场的倾向。电感特性是法拉第电磁感应定律的一个直接结果，即：

$$V(t)=\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} \tag{2-7}$$

其中，λ 是电流通过线圈绕组产生的总**磁通量**，其单位是韦伯(Wb)。电感周围的磁力线如图 2-12 所示。根据右手定则，可以确定线圈中磁力线的方向是图中箭头所示的南极至北极方向。右手定则规定，四指弯向线圈中电流的方向，大拇指所指的就是通电线圈的北极。对于理想线圈，磁通量与电流成比例：

$$\lambda=LI \tag{2-8}$$

其中，L 是线圈的电感，可以假定其为恒定值，电感的单位是**亨利**(H=Wb/A)。使用式(2-7)和式(2-8)，电感的电压-电流关系可以表示为：

$$V(t)=L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{2-9}$$

电感两端电压的大小与流过电感的电流变化率成正比。如果流过电感的电流增加($\mathrm{d}I/\mathrm{d}t>0$)，电压极性如图 2-12 所示。如果流过电感的电流减小($\mathrm{d}I/\mathrm{d}t<0$)，则电压极性与图中所示的电压极性相反。

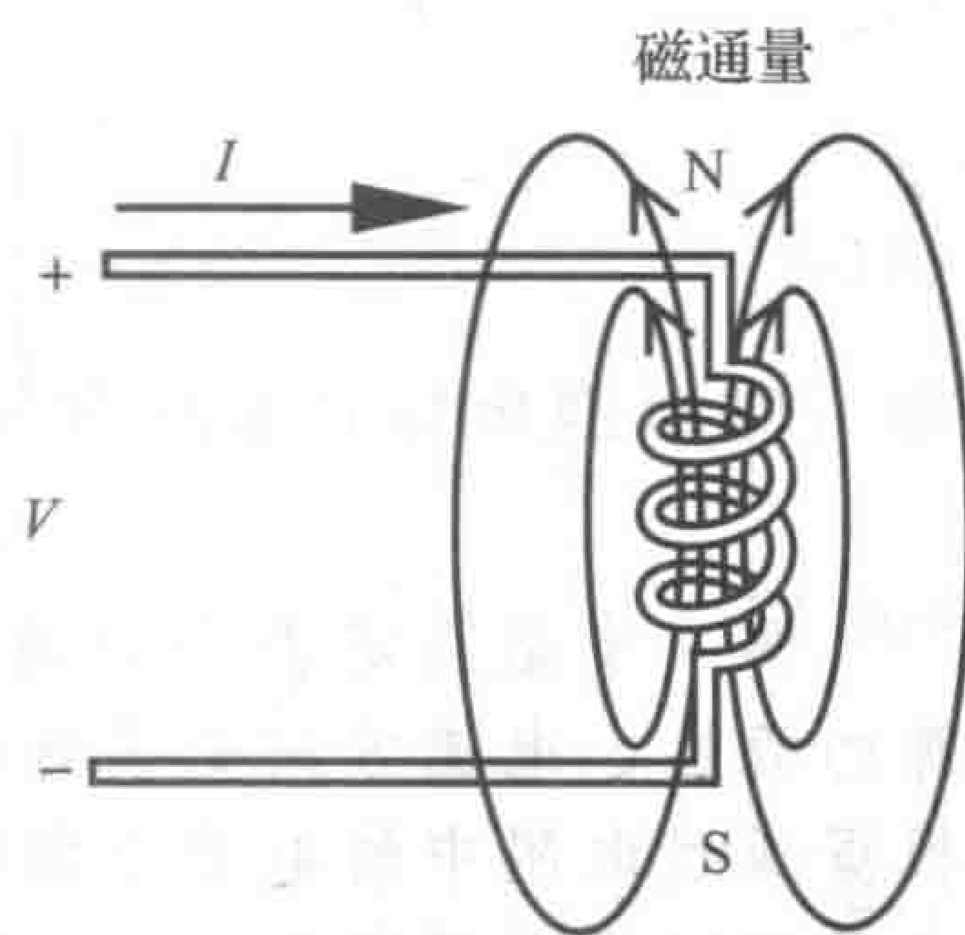


图 2-12 电感的磁链

将式(2-9)写成积分形式，得到如下关系：

$$I(t)=\frac{1}{L}\int_0^t V(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2-10}$$

其中，τ 是积分虚变量。从上式可以看出，流过电感的电流是电压的积分，所以电流不能突变。这对理解电路中电感中的功能很重要。增加或减少流过电感中的电流需要时间。一个重要的机电一体化系统部件是电动机，其内部线圈产生很大的电感，因此很难非常快速地起动或停止电动机。对电磁继电器和电磁线圈同样如此。

典型的电感值从 1μH～100mH。电感在电动机、继电器、电磁线圈、一些电源和高频电路中很重要。虽然一些制造商有电感的编码系统，但没有标准方法。电感值通常直接用 μH 或 mH 印刷在元件上。

2.3 基尔霍夫定律

本节对由电路元器件和电源共同组成的电路，计算任意位置处的电压和电流。不管电路有多么简单或复杂，基尔霍夫定律对于电路的分析和理解都是非常重要的。事实上，这些定律是复杂电路分析的基础，如晶体管电路、运算放大器或具有数百个元器件的集成电路。**基尔霍夫电压定律**(KVL)指出一个闭合回路的电压之和应为0(见图2-13)：

$$\sum_{i=1}^{N} V_i = 0 \tag{2-11}$$

注意，环路必须闭合，但是导线本身不需要闭合(如环路可以通过开路)。

将KVL应用到图2-13所示的电路，首先假设电路中每个支路的电流方向。然后为每个无源元器件上的电压分配适当的极性，并假定每个元器件在电流方向上的压降，电流流进无源元器件端显示"+"号，电流流出端显示"−"号。电压源的电压极性和电流源的电流方向必须始终维持给定方向不变。从电路中的任何点开始(如图2-13所示的节点A)，沿顺时针或逆时针方向(图2-13所示为顺时针方向)对每个元器件上的电压求和，为环路中每个元器件的电压设定为遇到的第一个代数符号。对于图2-13，结果将是：

$$-V_1 - V_2 + V_3 + \cdots - V_N = 0 \tag{2-12a}$$

或者，可以根据经过元器件的电压是增加(从−到+分配为+)还是下降(从+到−为−)来设置符号。使用这个约定，式(2-12a)可以写成：

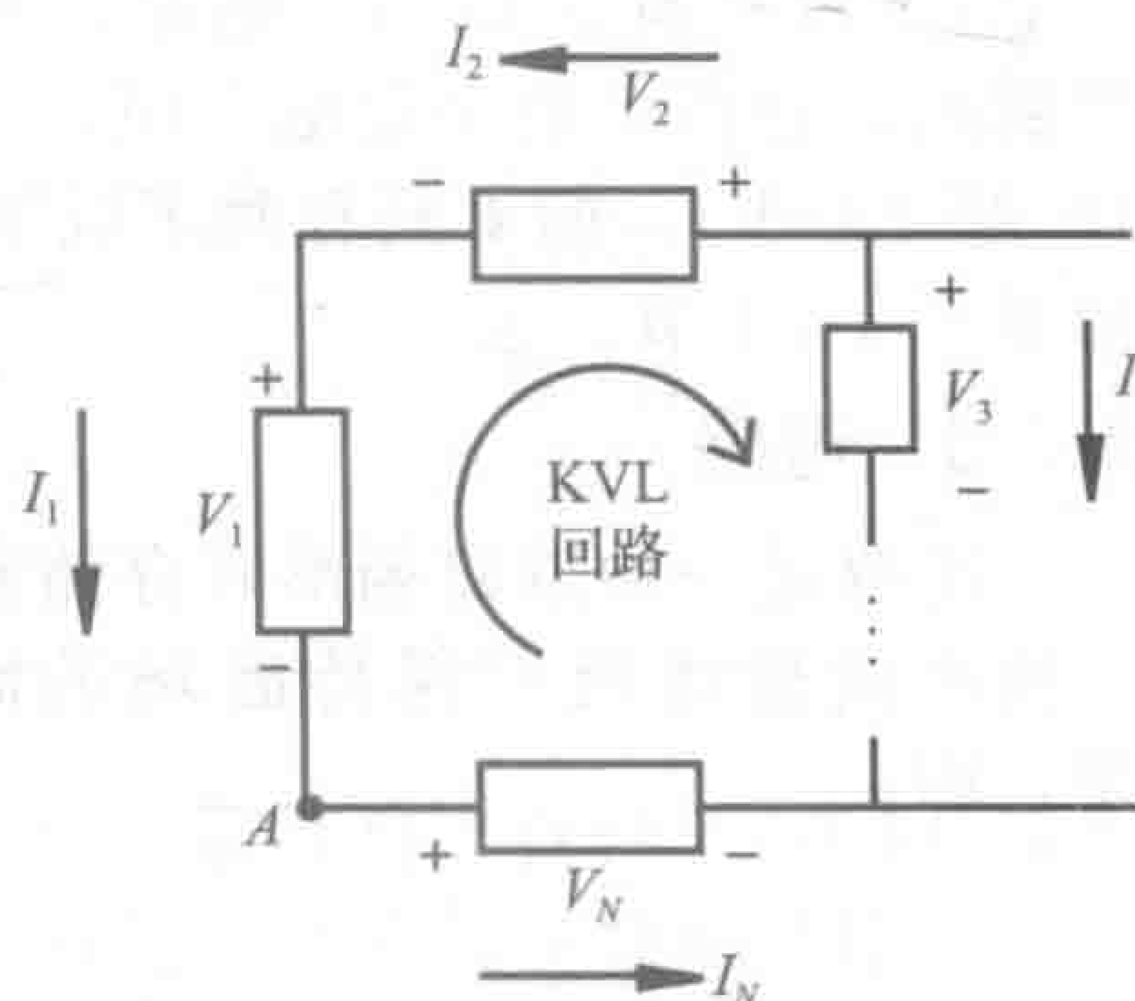


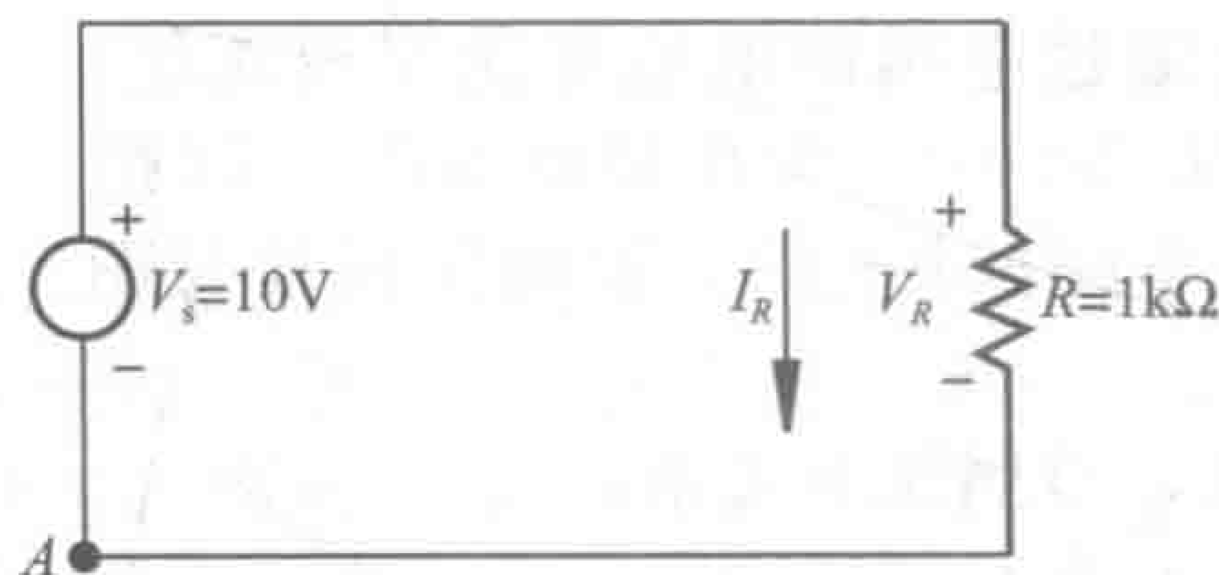
图 2-13　基尔霍夫电压定律

$$V_1 + V_2 - V_3 + \cdots + V_N = 0 \tag{2-12b}$$

式(2-12a)和式(2-12b)是等价的，但第二个式子更直观地反映了电路中实际电压的变化情况。尽管如此，第一个式子更为通用，可能是因为其不必过多地考虑电压的增减方向。

例 2.3　　基尔霍夫电压定律

KVL可以用于计算电路中的电流 I_R。



第一步是假定I_R的电流方向，选定的方向如图所示。对于这样简单的电路，根据恒压源的极性，电流方向是很好确定的；但对更复杂的电路，电流方向可能不那么明显。然后根据通过电阻中的电流方向确定电压降的极性。如果电流沿相反方向流动，则电阻两端的电压极性也必须相反。无论电流方向如何，电压源的极性都是固定的。从A点开始沿顺时针方向绕环路前进，将每个元器件的电压符号置为第一个遇到的代数符号，则有：

$$-V_s + V_R = 0$$

根据欧姆定律有：

$$-V_s + I_R R = 0$$

故：

$$I_R = V_s/R = 10\text{V}/1000\Omega = 10\text{mA}$$

基尔霍夫电流定律(KCL)指出流入一个封闭面或节点的电流之和为0。参考图2-14，可知

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \tag{2-13}$$

更为一般的形式参见图2-14b，有

$$\sum_{i=1}^{N} I_i = 0 \tag{2-14}$$

请注意，流入节点或平面的电流为正值，流出的电流为负值。

在分析电路时，你可以任意设定电流的方向，并在原理图上用箭头来表示。如果电流的计算结果为负值，则电流的实际方向与假定方向相反。同样，假设电压降必须与假设的电流方向一致，如果计算出电压为负值，则其实际极性与所示的极性相反。

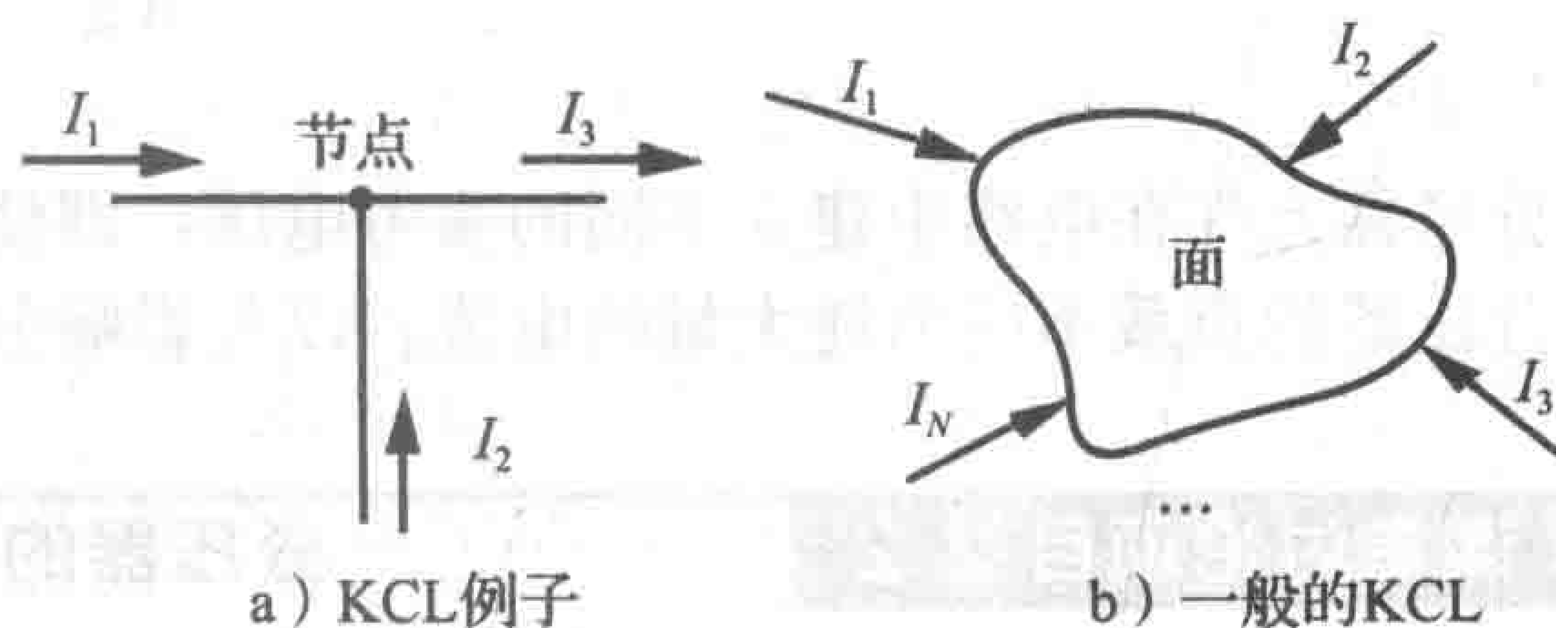


图2-14 基尔霍夫电流定律

实验练习1介绍了本章目前提出的许多基本概念，可用于培养以下实践能力：

- 使用面包板组装基本电路(见视频演示2.4)
- 进行电压和电流测量(见视频演示2.5)
- 读电阻和电容值

与此有关的更多信息和资源也可在2.10节中找到。

2.3.1 串联电阻电路

将基尔霍夫电压定律应用于图2-15所示的简单串联电阻电路中，可以得到一些有用的结果。假设电流I的方向，从节点A开始沿顺时针方向可得：

$$-V_s + V_{R_1} + V_{R_2} = 0 \tag{2-15}$$

根据欧姆定律，有：

$$V_{R_1} = IR_1 \tag{2-16}$$

$$V_{R_2} = IR_2 \tag{2-17}$$

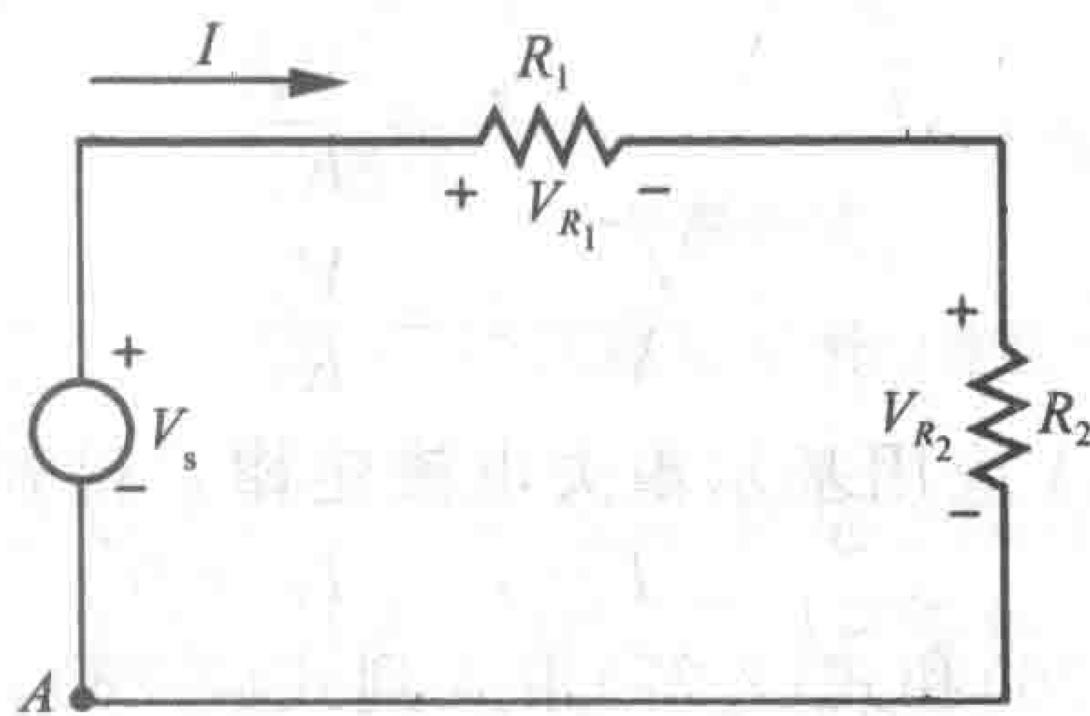


图2-15 串联电阻电路

将式(2-16)和式(2-17)带入到式(2-15)中，得到：

$$-V_s + IR_1 + IR_2 = 0 \tag{2-18}$$

求得I：

$$I = \frac{V_s}{(R_1 + R_2)} \tag{2-19}$$

注意，如果某个电阻的阻值为$R_1 + R_2$，则可得到同样的结果。因此串联时电阻增加，串联电阻的等效电阻为：

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \tag{2-20}$$

一般情况下，N个串联电阻可以用一个等效电阻来替换，即：

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{N} R_i \tag{2-21}$$

将基尔霍夫电压定律应用于电容和电感电路中，可以看出(见问题2.11和问题2.13)串联的两个电容器的等效电容为：

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \tag{2-22}$$

串联的两个电感的等效电感为：

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \tag{2-23}$$

包含两个串联电阻的电路称为**分压器**，因为源电压V_s分到每个电阻上。将式(2-19)

代入式(2-16)和式(2-17)，电阻上的电压表达式可以表示为：

$$V_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_s, \quad V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_s \tag{2-24}$$

一般说来，若 N 个电阻串联在电源电压 V_s 两端，则电阻 R_i 两端的电压 V_{R_i} 为：

$$V_{R_i} = \frac{R_i}{R_{eq}}V_s = \frac{R_i}{\sum_{j=1}^{N} R_j}V_s \tag{2-25}$$

分压器允许在电路中建立不同的参考电压，即使电路仅由单个输出电源供电。但值得注意的是，分压器的负载不应消耗大量的电流，以免影响分压器产生的电压基准(见课堂讨论项目 2.2)。

课堂讨论项目 2.2　　分压器的不当应用

车用 12V 电池，可以为车上的低压电路供电。为什么使用一个简单的分压器为需要可变电流的电路提供低压供电是不合适的?

2.3.2 并联电阻电路

将 KCL 应用于图 2-16 所示的简单并联电阻电路，也会得到一些有用的结果。由于每个电阻都并联至相同的电压源上，所以每个电阻两端的电压都是 V_s，根据欧姆定律：

$$I_1 = \frac{V_s}{R_1} \tag{2-26}$$

$$I_2 = \frac{V_s}{R_2} \tag{2-27}$$

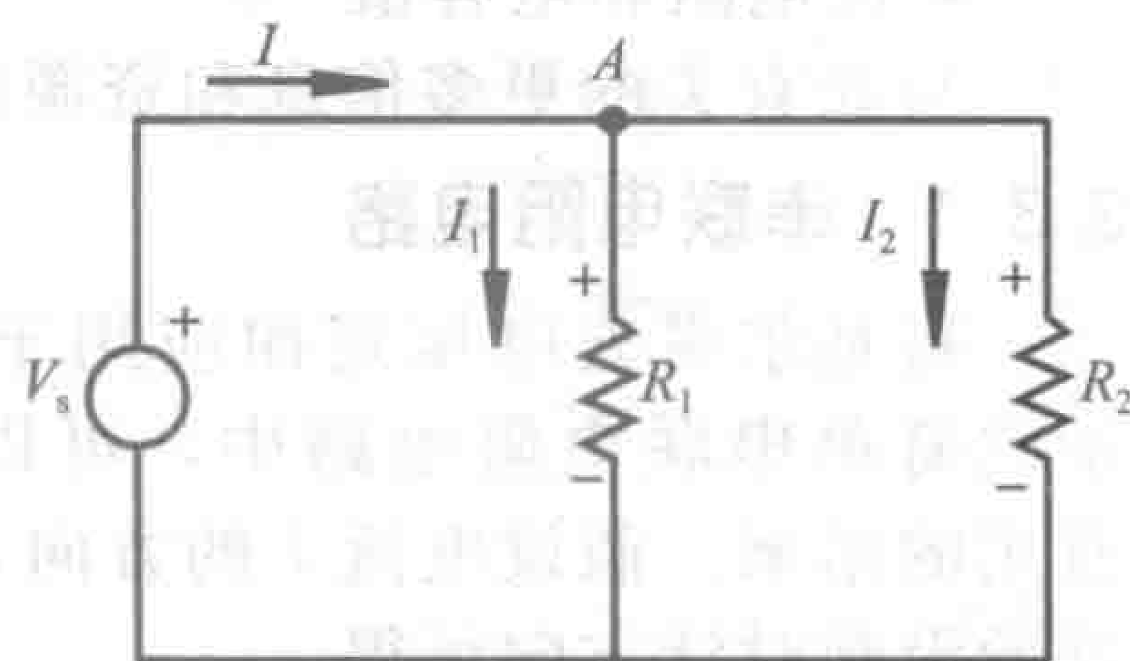


图 2-16 并联电阻电路

在节点 A 应用基尔霍夫电流定律，得到：

$$I - I_1 - I_2 = 0 \tag{2-28}$$

将式(2-26)和式(2-27)带入到式(2-28)，得到：

$$I = \frac{V_s}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} = V_s\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{2-29}$$

将电阻值 R_1 和 R_2 分别用电导 $1/G_1$ 和 $1/G_2$ 替换，得到：

$$I = V_s(G_1 + G_2) \tag{2-30}$$

电导值为(G_1+G_2)的单个电阻也会得到相同的结果。因此，并联会导致电导值增加，将式(2.30)写成：

$$I = V_s G_{eq} = \frac{V_s}{R_{eq}} \tag{2-31}$$

其中，G_{eq}是等效电导；R_{eq}是等效电阻。比较式(2-31)的右边和式(2-29)，得到：

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{2-32}$$

或者

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{2-33}$$

一般，N 个电阻并联时的等效电阻可表示为：

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i} \tag{2-34}$$

或者

$$R_{eq} = 1/\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i} \tag{2-35}$$

将基尔霍夫电流定律应用于电容和电感电路，可以发现(见问题 2.12 和 2.14)两个电容并联时电容值增加：

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \tag{2-36}$$

两个电感并联时：

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \tag{2-37}$$

包含两个并联电阻的电路称为分流器，因为源电流 I 被分到了每个电阻上。根据式(2-29)可以求得 V_s，代入到式(2-26)和式(2-27)，得到：

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \tag{2-38}$$

视频演示 2.6 说明了并联和串联照明电路的差异，这个演示说明了电压和电流的分配及其对功率输出的影响。

手动或使用软件绘制电路原理图时，值得注意的是如何在图形的交叉线处显示连接(或不连接)。图 2-17 给出了交叉线处连接或不连接的两种约定形式。图 2-17a 所示的连接方式是最常见的，在例 2.4 中使用了该方式，在交叉线处用实心点表明处于连接状态，没有实心点则表明没有连接。图 2-17b 所示为另一种约定的连接形式，在交叉线处用弧线来表示未连接，这样无须用实心点来表示连接状态。本章中的电路图非常简单，默认有交叉线的地方都是连接的。如例 2.4 中电路的连接点可以省略。对于简单电路，除非电路中交叉线处加了实心点或弧线，否则可以默认所有交叉线都为连接状态。但对于更复杂的电路(如第 7 章中一些复杂的基于微控制器的解决方案)来说，清晰和统一的电路表达形式对理解和表达设计者的意图是很重要的。

或　或　连接　未连接

a）点形式

或　连接　或　未连接

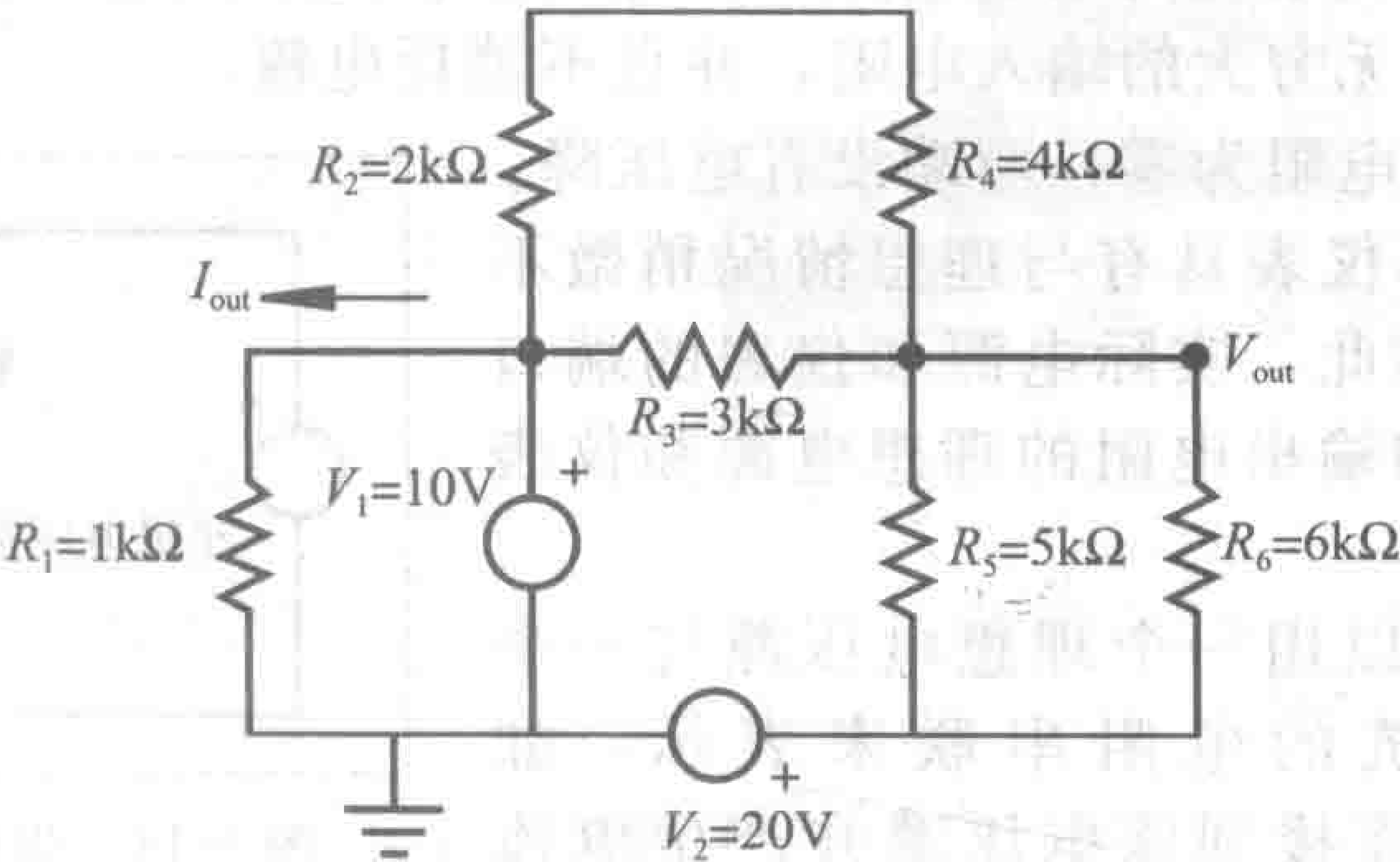
b）弧形式

图 2-17　电路原理图的连接约定

实验练习 2 中提供了各种仪器的使用经验，包括示波器、万用表、电源和函数发生器(见视频演示 2.5)。该实验还涵盖了欧姆定律、基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律的实际应用，主要用于实际电路中的电压和电流测量。视频演示 2.7 显示了各种类型的电缆和连接器，它们可将仪器彼此连接和连接到电路中。网络链接 2.5 是一个很好的资源，可以帮助回顾许多与电力和直流电路分析相关的内容。

例 2.4　　电路分析

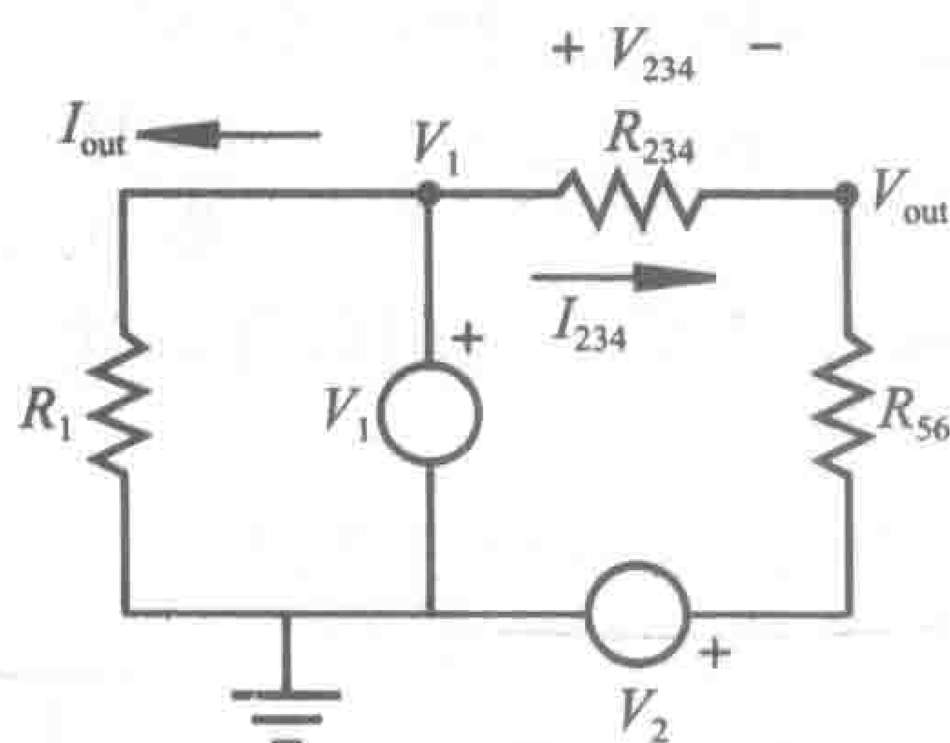
将前面章节给出的理论应用于下图所示的电路，目标是计算 I_{out} 和 V_{out}。在电路中的任何节点，如节点 V_{out}，其电压值以接地符号“⏚”确定的参考地为基准进行定义，任意两点之间的电压差可以通过它们相对于参考地的电压值相减而获得。



第一步是根据串联和并联电阻公式[见式(2-20)和式(2-33)]计算电源(V_1和V_2)之间和电源周围以及感兴趣支路(I_{out}和V_{out}支路)的等效电阻。电阻R_2和R_4串联，等效电阻是R_2+R_4，再与电阻R_3并联。电阻R_5和R_6并联。因此，可以得到电路的等效电阻为：

$$R_{234}=\frac{(R_2+R_4)R_3}{(R_2+R_4)+R_3}=2.00\text{k}\Omega$$

$$R_{56}=\frac{R_5R_6}{R_5+R_6}=2.73\text{k}\Omega$$



将基尔霍夫电压定律应用于左边的环路，得到：

$$V_1=I_{out}R_1$$

因此

$$I_{out}=V_1/R_1=10\text{V}/1\text{k}\Omega=10\text{mA}$$

将基尔霍夫电压定律应用于右边的回路，根据图中所示假定I_{234}的方向，作用于R_{234}和R_{56}上的总电压为(V_1-V_2)。使用分压公式[见式(2-24)]来确定R_{234}在I_{234}假定方向上的压降：

$$V_{234}=\frac{R_{234}}{R_{234}+R_{56}}(V_1-V_2)=-4.23\text{V}$$

由于V_1以地为参考点，所以电阻R_{234}左侧的电压也为V_1；并且因为电阻R_{234}两端的压降为V_{234}，所以输出电压：

$$V_{out}=V_1-V_{234}=14.2\text{V}$$

注意：因为V_{234}是负的，所以实际流过R_{234}的电流方向与假设的方向相反。

求解此类问题有很多种方法(如问题2.24)，这里只给出了其中一种方法，不一定是最好的方法。

2.4　电压源、电流源和仪表

当在纸上分析电路时，通常认为电源和仪表是理想的。然而，实际的物理元器件是非理想的，当实际电路中包含这些元器件时，必须考虑其局限性。通常假定下列理想情况：

- **理想电压源**的输出电阻为零，并可提供无限大电流。
- **理想电流源**具有无限大的输出电阻，并可以提供无限大电压。
- **理想电压表**具有无穷大的输入电阻，并且不消耗电流。
- **理想电流**表输入电阻为零，两端没有电压降。

然而，实际电源和仪表具有与理想情况稍微不同的端口特性。尽管如此，实际电源和仪表的端口特性可以用带有输入和输出电阻的理想电源和仪表来建模。

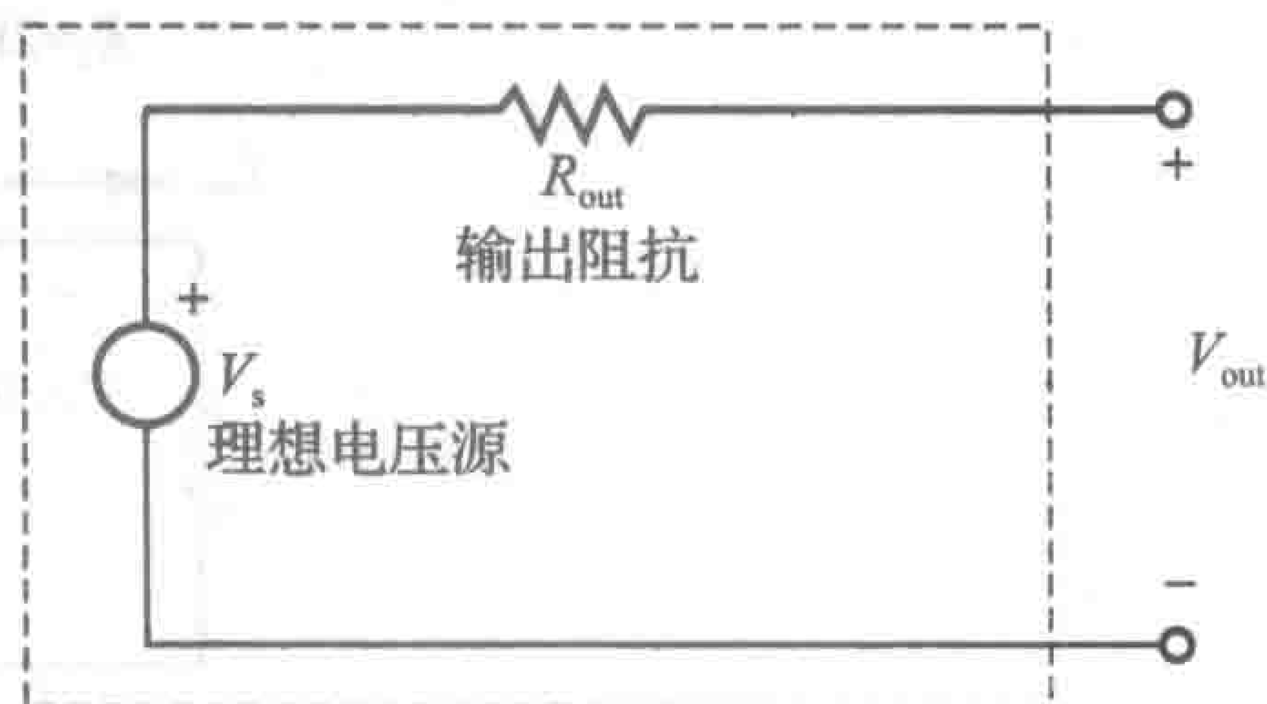


图 2-18　带输出阻抗的实际电压源

“实际”电压源可以用一个理想电压源与一个称为元器件**输出阻抗**的电阻串联来表示，如图2-18所示。当负载连接到该电压源并产生电流

时，由于分压的影响，输出电压 V_{out} 将与理想电源电压 V_s 不同。大多数市场上售卖的电压源(如电源)的输出阻抗非常小，通常小于 1Ω。对于大多数应用，这种阻抗小到可以忽略。然而驱动小电阻电路时，输出阻抗很重要，因为其增加了电路的电阻。图 2-19 显示了两个市场上售卖的电压源。图中上部是一个三输出的电压源，可以提供 3 个不同的对地电压，可以从 0V 调节至 9V、20V 和 −20V，图中下部是一个可编程电源，它是一种通过数字控制的电压源。

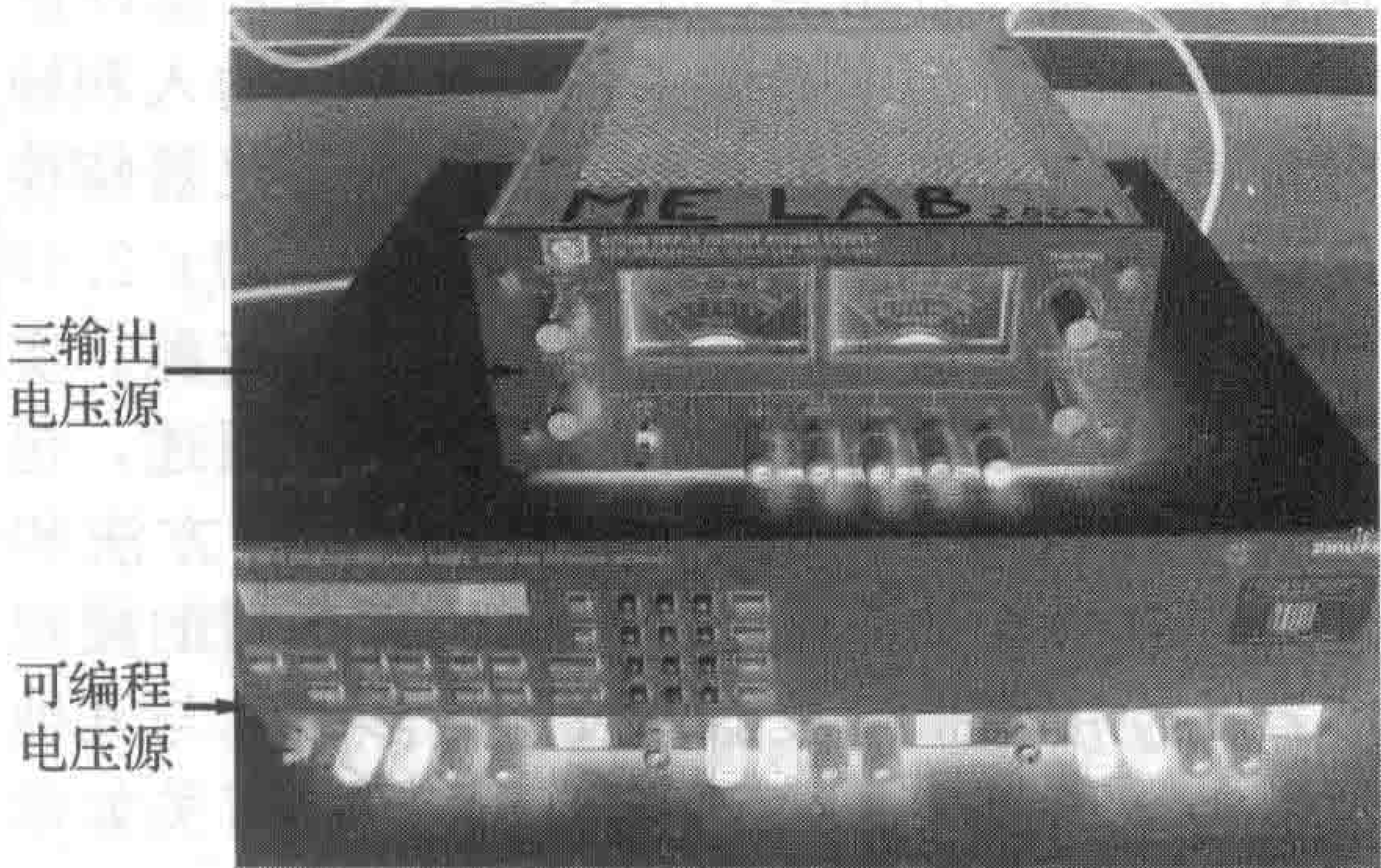


图 2-19　市售电压源的实例

“实际”电流源可以用一个理想的电流源并联一个输出阻抗的形式来表示，如图 2-20 所示。当负载连接到电流源时，源电流 I_s 分配给输出阻抗和负载。大多数商用电流源的输出阻抗非常大，可以最大限度地减少电流分流效应。然而，当驱动大电阻电路时，其输出阻抗是非常重要的。

“实际”电流表可以用一个理想安培表串联一个称为**输入阻抗**的电阻来表示，如图 2-21 所示。大多数电流表的输入阻抗很小，这可以在电路中最大限度地减少压降 V_R。然而，当测量电流时，若其电路支路的电阻很小时，该电阻是很重要的，因为其增加了支路的电阻。

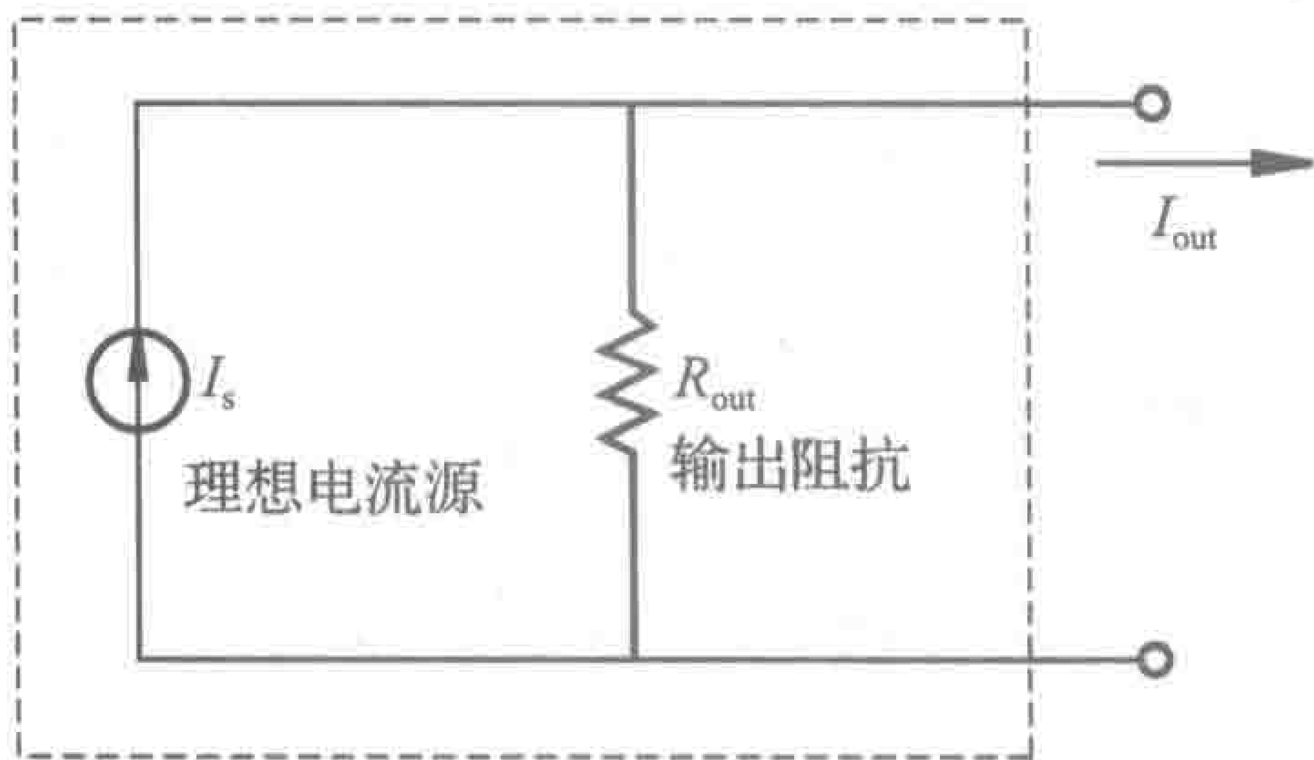


图 2-20　带输出阻抗的实际电流源

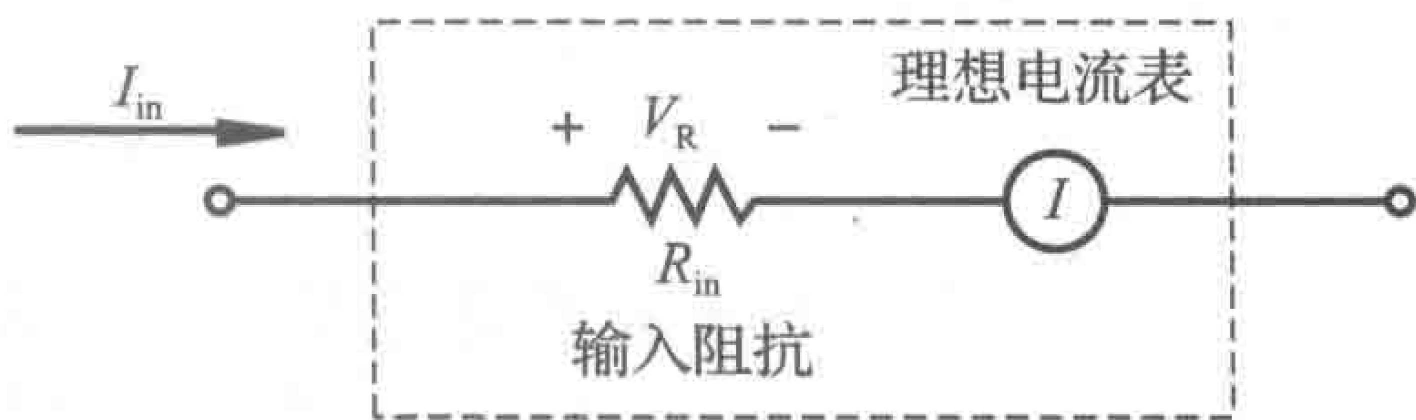


图 2-21　带输入阻抗的电流表

“实际”电压表可以用一个理想电压表并联一个输入阻抗来表示，如图 2-22 所示。大多数电压表(如示波器或万用表)的输入阻抗非常大，通常在 1～10MΩ。然而，当测量大电阻支路上的电压时必须考虑该电阻，因为仪表输入阻抗和电路支路的并联将会导致测量值的显著误差。

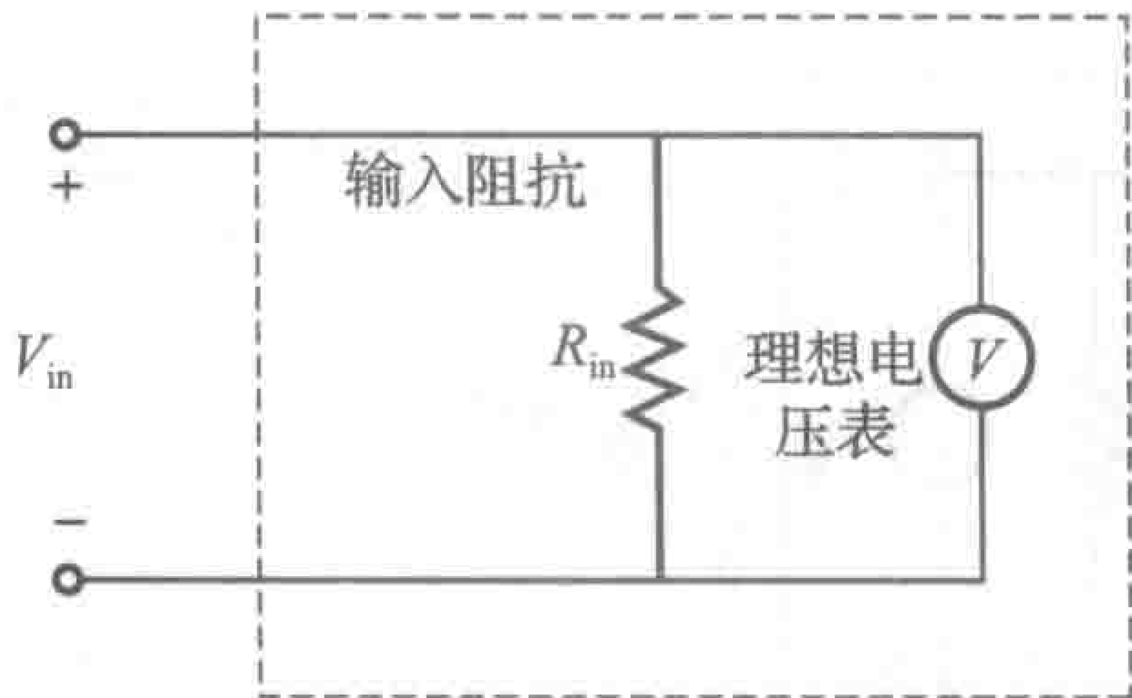


图 2-22　带输入阻抗的电压表

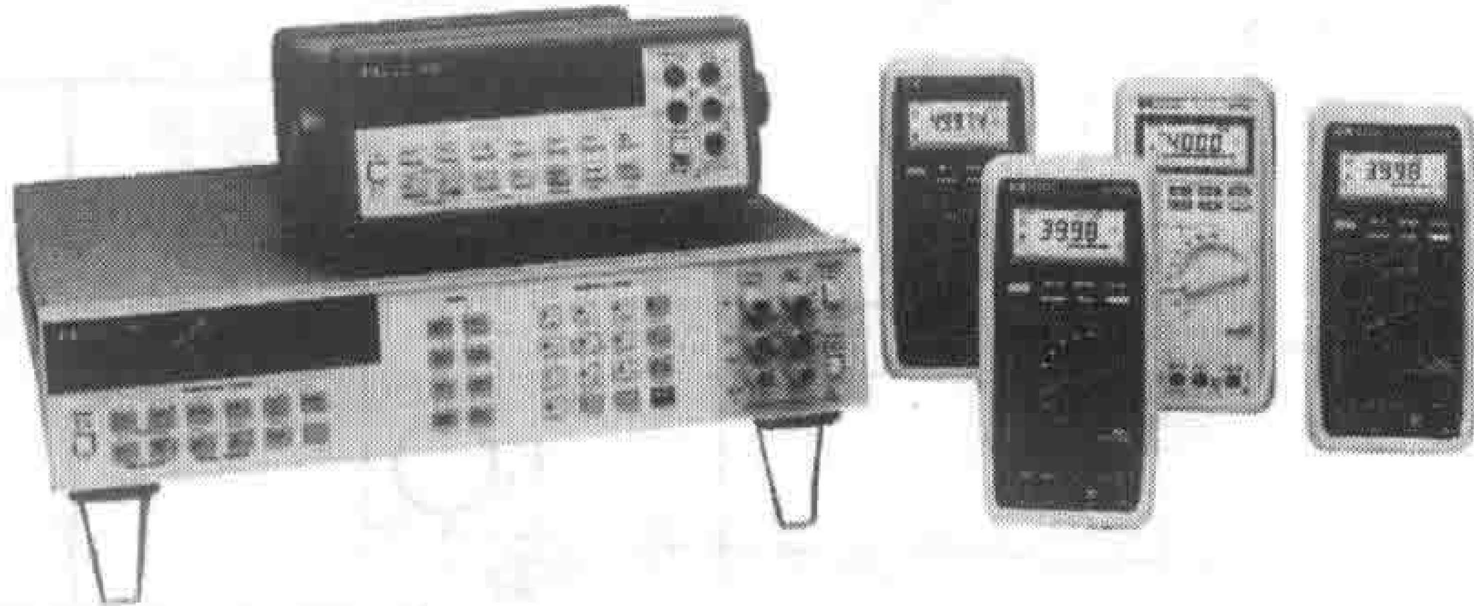

图 2-23　数字万用表(由 Hewlett Packard，Santa Clara，CA 提供)

图 2-23 所示为市场上可买到的一些**数字万用表**(DMM)，包括了电流表和电压表。

图 2-24 所示为一个商用示波器，其包含了一个能够数字化、显示和记录动态测量值的电压表。网络链接 2.6 提供了各种在线资源和供应商提供的各种各样仪器仪表的链接(电源、函数发生器、万用表、示波器、数据采集设备等)。

实验练习 2 中提供了各种仪器的输入和输出阻抗影响电路测量的经验。了解这些仪器特性如何影响电压和电流的测量是很重要的。2.10.3 节提供了关于这些内容的更多信息和资源。实验练习 3 提供了如何使用示波器的完整概述，包括如何连接信号、接地、耦合和触发的方法和特性。视频演示 2.8 演示了如何使用典型的模拟示波器。使用模拟示波器涉及的许多概念与其他示波器甚至更复杂的数字示波器相关。有关如何正确使用示波器的更多信息和资源参见 2.10.5 节。

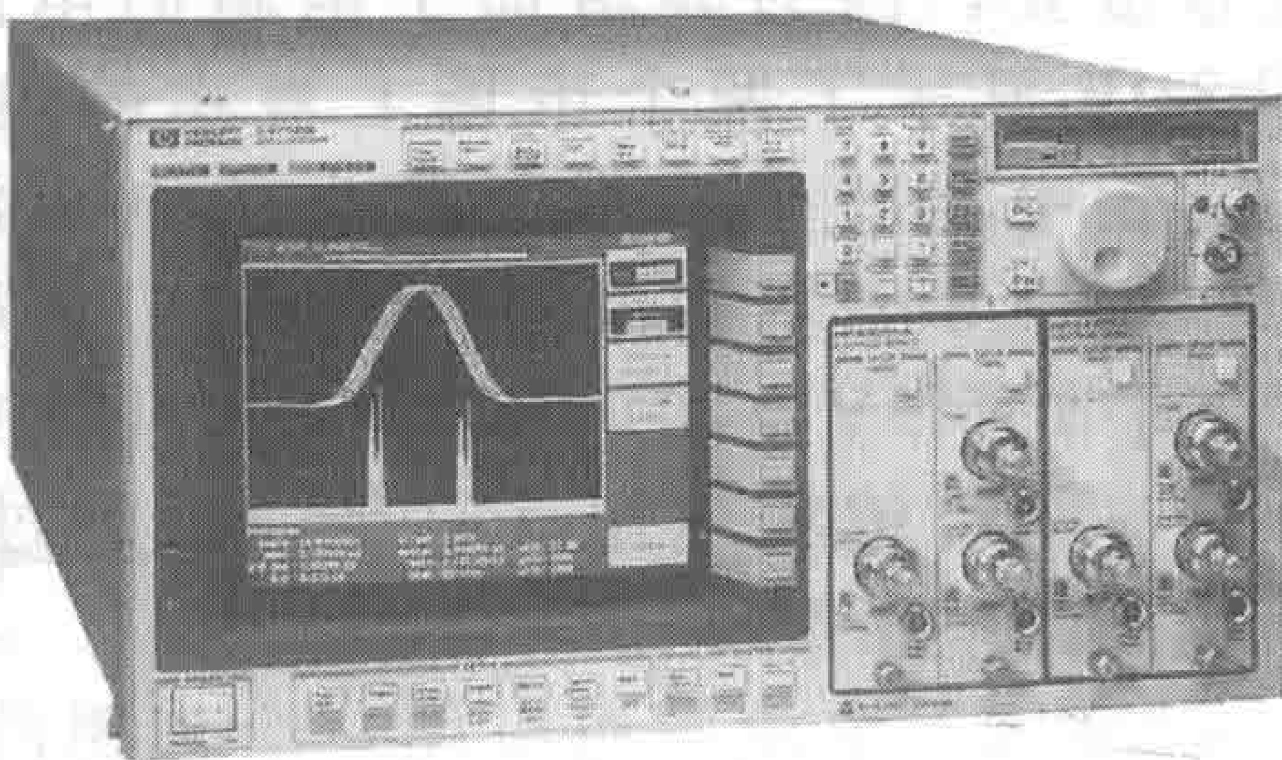
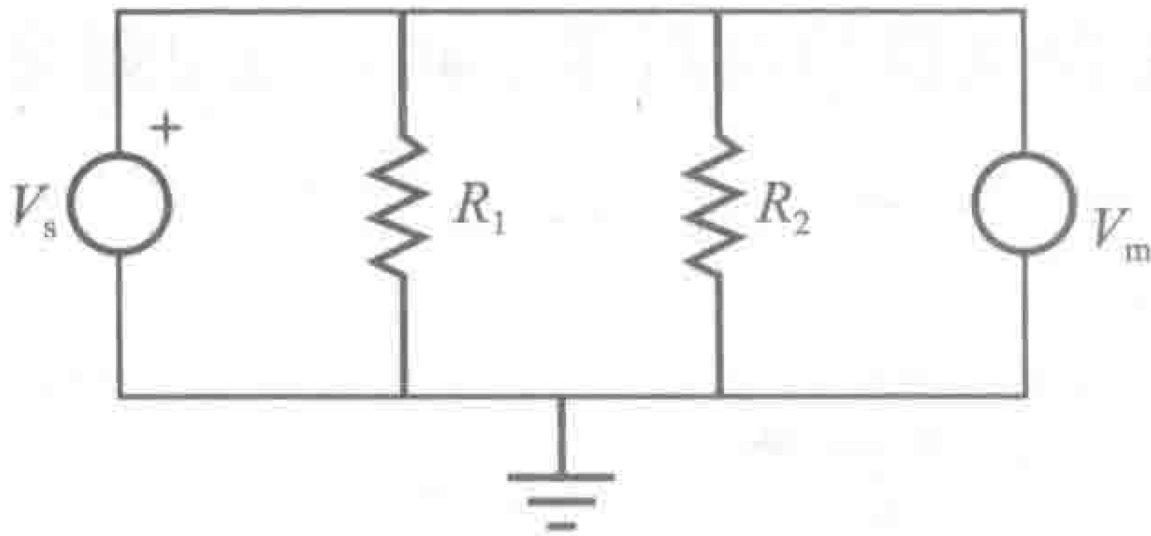


图 2-24 示波器(由 Hewlett Packard，Santa Clara，CA 提供)

例 2.5 输入和输出阻抗

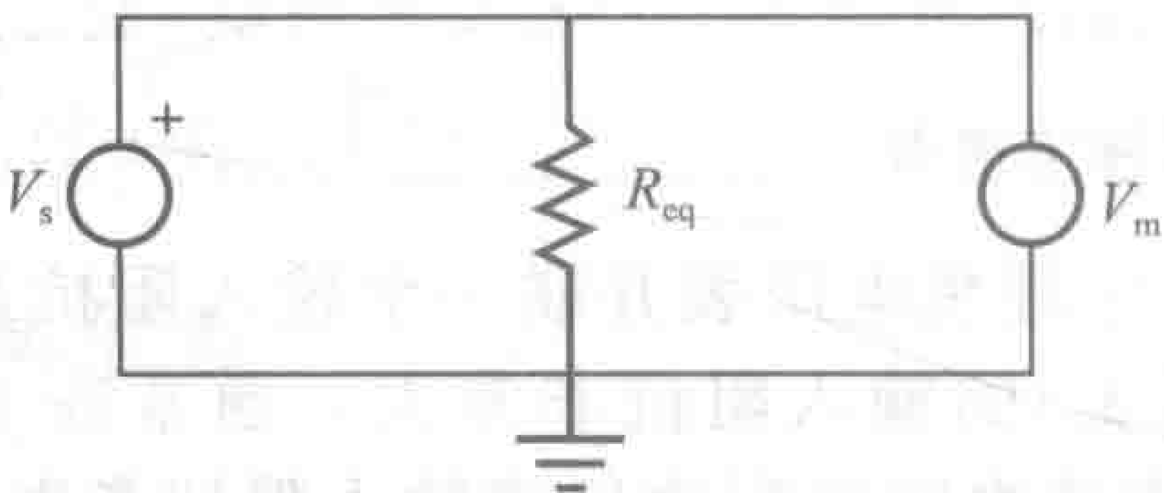
此例说明了电源和仪表的输出和输入阻抗对电路测量的影响。考虑下图所示的电路，它包含了电压源 V_s 和电压表 V_m。



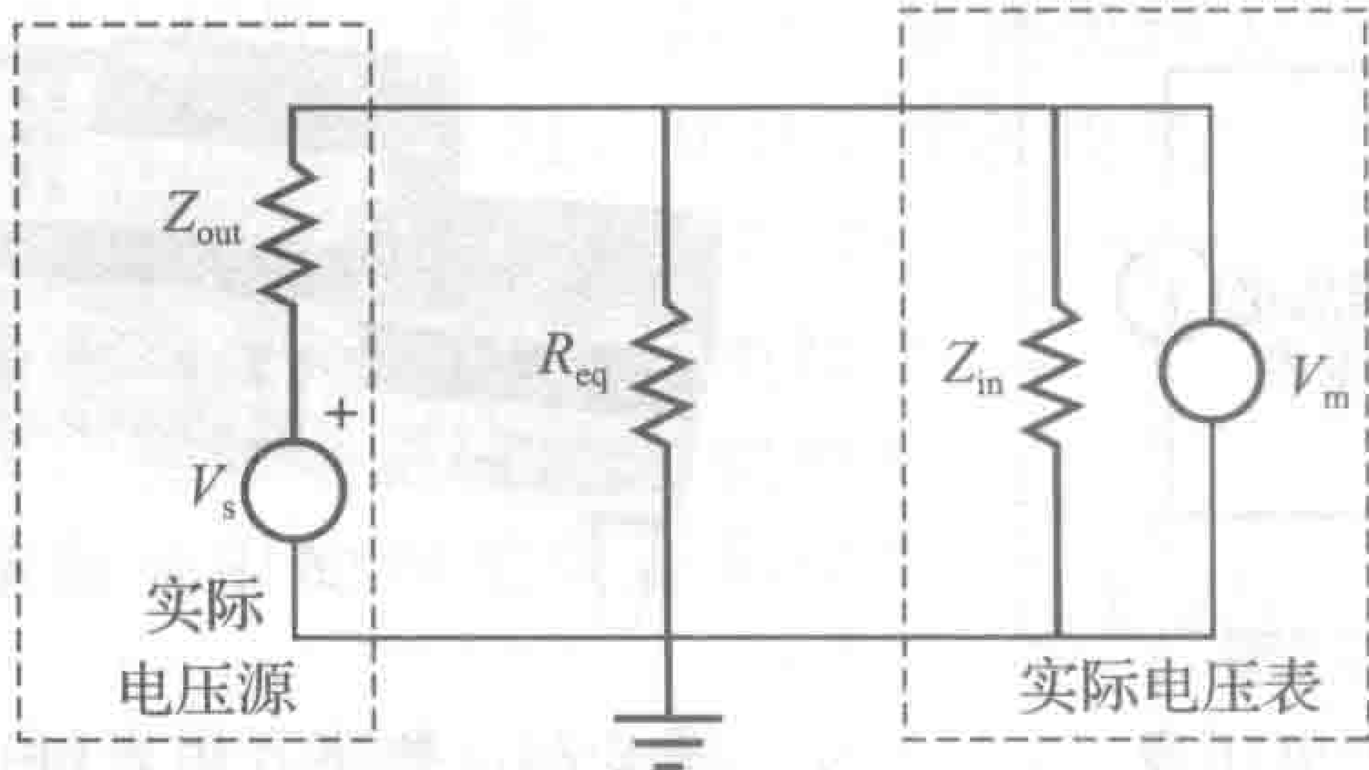
此电路的等效电阻为：

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

如果电压源和电压表都是理想的，则测量的电压 V_m 等于 V_s，其等效电路如下所示：

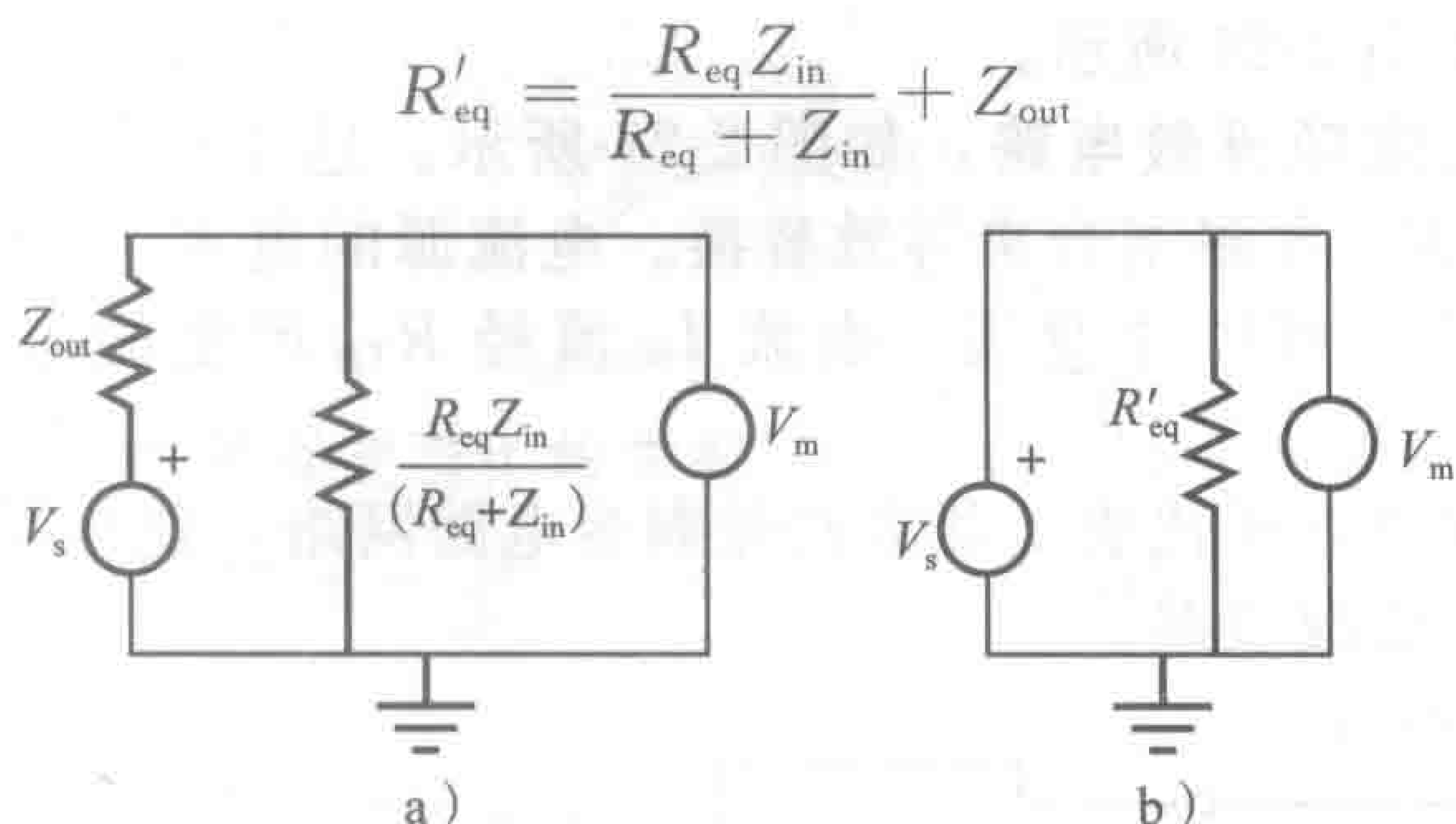


然而，如果电压源具有输出阻抗 Z_{out} 并且电压表具有输入阻抗 Z_{in}，则“实际”电路如下图所示：



将 R_{eq} 和 Z_{in} 并联得到如下图 a 所示的电路。因为没有电流流过理想电压表 V_m，所以 Z_{out} 和并联的 R_{eq} 和 Z_{in} 相串联。因此，下图 b 所示电路的总等效电阻为：

$$R'_{eq} = \frac{R_{eq}Z_{in}}{R_{eq}+Z_{in}} + Z_{out}$$



当 Z_{in} 接近于无穷，Z_{out} 接近 0 时，上式中的 R'_{eq} 接近 R_{eq}。根据图 a 中的分压电路可知，实际电压表测量的电压为：

$$V_m = \frac{\dfrac{R_{eq}Z_{in}}{(R_{eq}+Z_{in})}}{\dfrac{R_{eq}Z_{in}}{(R_{eq}+Z_{in})}+Z_{out}}V_s = \frac{R'_{eq}-Z_{out}}{R'_{eq}}V_s$$

当 $Z_{in}=\infty$，$Z_{out}=0$ 时，测量的电压 V_m 等于 V_s。但是作为一个实际的电压源和电压表，测得的电压不可能等于期望的理想结果，例如，当 $R_1=R_2=1\text{k}\Omega$，则：

$$R_{eq} = \frac{1\times 1}{1+1}\text{k}\Omega = 0.5\text{k}\Omega$$

如果 $Z_{in}=1\text{M}\Omega$，$Z_{out}=50\Omega$，则：

$$R_{eq} = \frac{0.5\times 1000}{0.5+1000}\text{k}\Omega + 0.05\text{k}\Omega = 0.550\text{k}\Omega$$

因此，如果 $V_s=10\text{V}$，则：

$$V_m = \left(\frac{0.550-0.05}{0.550}\right)10\text{V} = 9.09\text{V}$$

该计算结果显然与理想电压源和电压表的预期结果(10V)不同。

2.5　戴维南和诺顿等效电路

为了简化复杂电路的分析，希望用等效电压源和串联电阻来替代实际的电压源和电阻网络，这也称为**戴维南等效**电路。戴维南定理指出，给定线性网络中的一对端子，网络可以等效变换为一个理想电压源 V_{OC} 串联一个电阻 R_{TH} 的形式，其中 V_{OC} 等于端子两端的开路电压，R_{TH} 是端子两端的等效电阻，即独立电压源用短路替代，独立电流源用开路替代时的阻抗。

对图 2-25 所示的电路，应用戴维南等效电路替代虚线框中的电路，开路电压 V_{OC} 等于将其他电路与虚线框内电路断开后余下的开路端子两端的电压。根据分压原则，得到：

$$V_{OC} = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_s \tag{2-39}$$

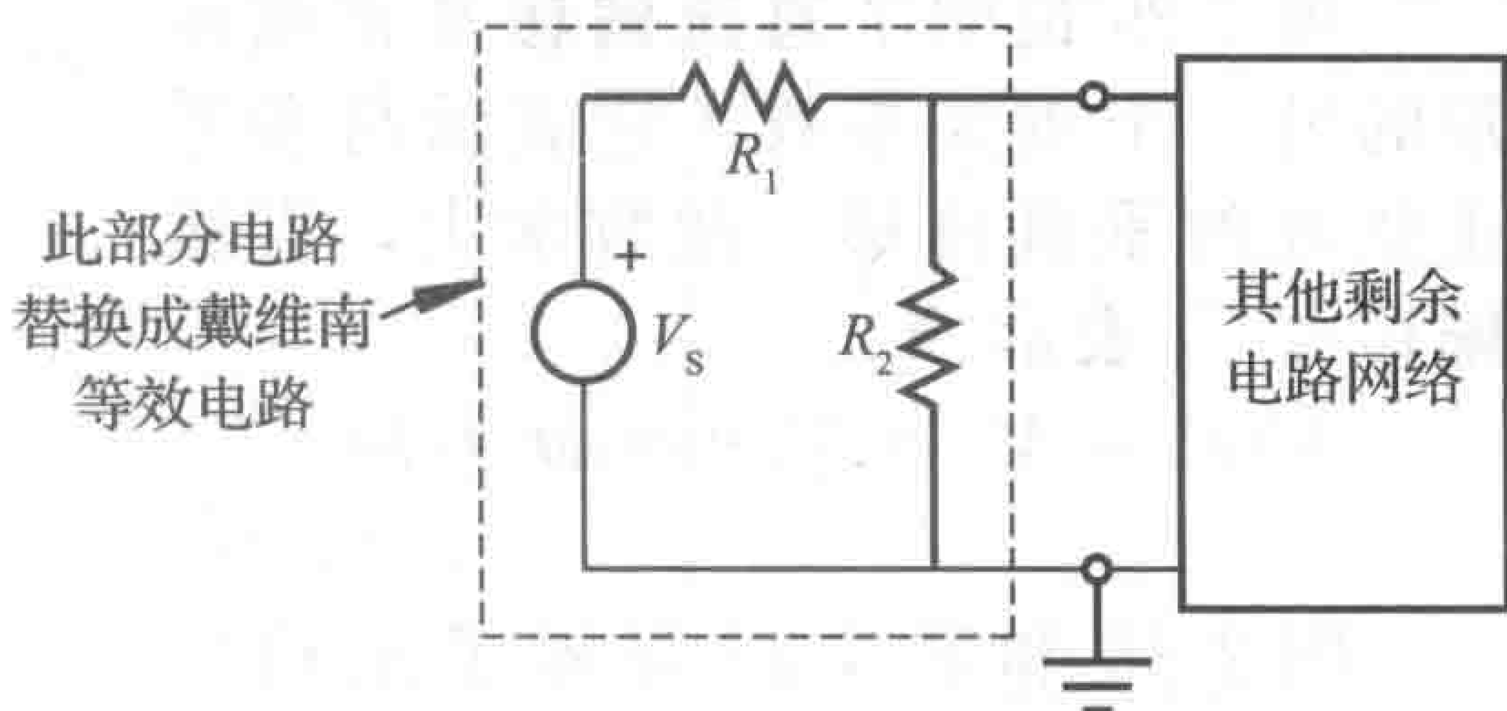


图 2-25　戴维南定理的说明示例

将电源 V_s 短接(即 $V_s=0$)，使得 R_1 的左端接地，即可确定 R_{TH}。如果电路中有电流源，则需要将它设置成开路。因为 R_1 和 R_2 相对于开路端是并联的，所以等效电阻是：

$$R_{TH} = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \tag{2-40}$$

戴维南等效电路如图 2-26 所示。

另一个等效电路是**诺顿等效电路**，如图 2-27 所示。这里线性网络可以用一个理想电流源 I_{SC} 和戴维南电阻 R_{TH} 并联组合来等效替换。电流源的电流 I_{SC} 等于其他电路移除后剩余的电路短路时的电流，可以注意到，电流 I_{SC} 流经 R_{TH} 产生的电压即为前述戴维南电压 V_{OC}。

戴维南和诺顿等效独立于代表负载的其他剩余电路网络，这样可以在不重新分析戴维南或诺顿等效的情况下更改负载。

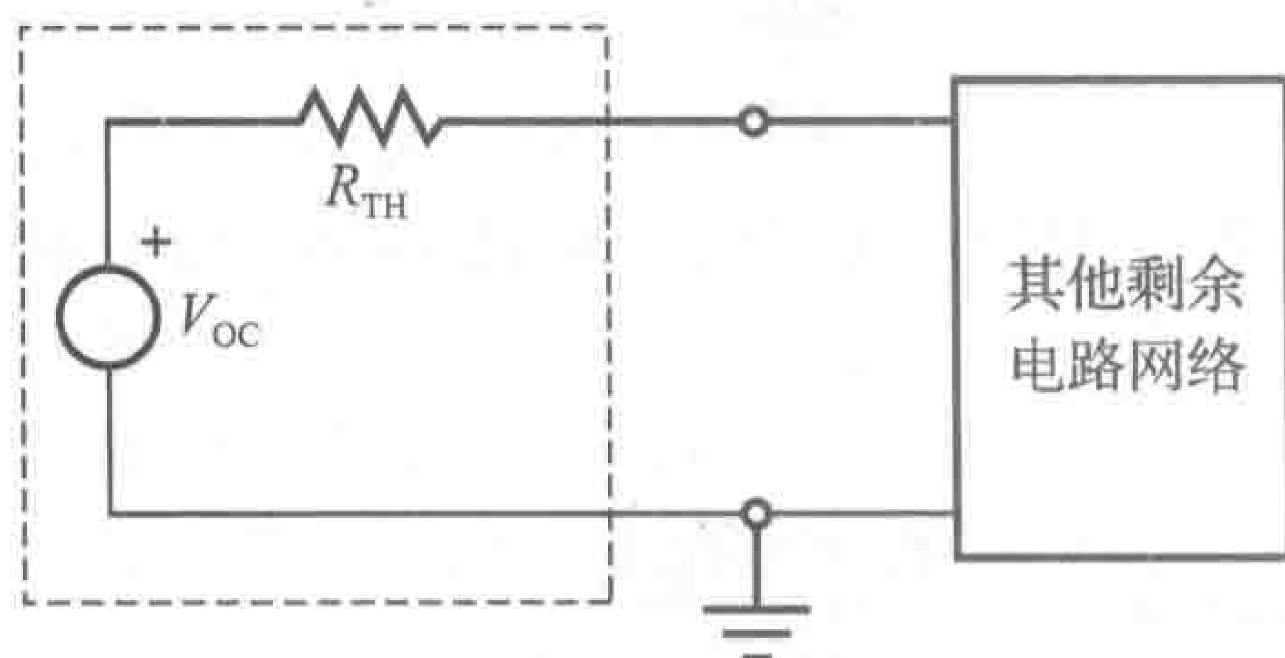


图 2-26　戴维南等效电路

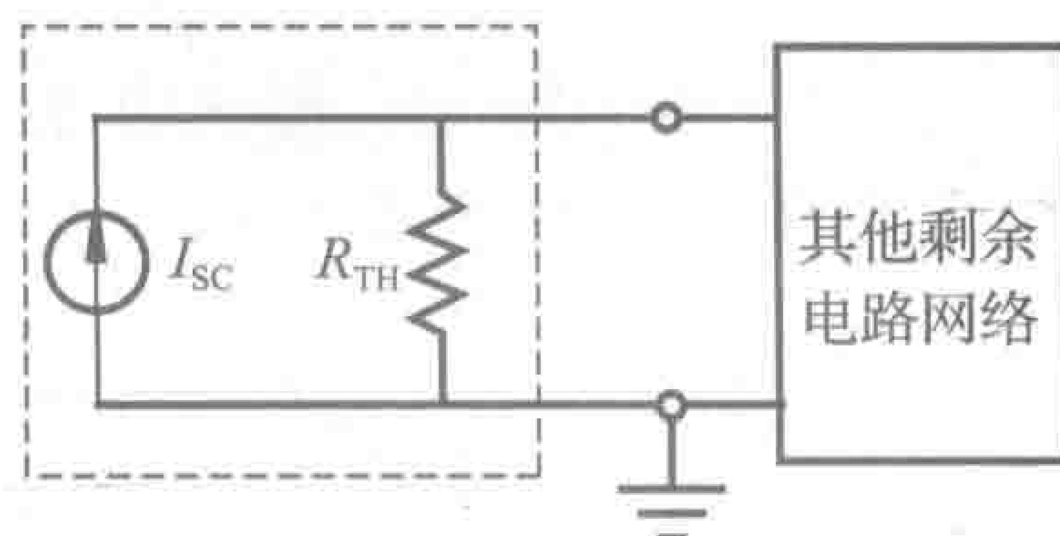


图 2-27　诺顿等效电路

2.6　交流电路的分析

当线性电路由给定频率的交流(AC)信号激励时，电路中每个元器件上流过的电流和两端的电压是相同频率的交流信号。图 2-28 所示为正弦交流电压 $V(t)$，其数学表达式为：

$$V(t)=V_m\sin(\omega t+\phi) \tag{2-41}$$

其中，V_m 是信号的**幅值**；ω 是**角频率**，单位是 rad/s；ϕ 是相对于参考正弦信号 $V(t)=V_m\sin(\omega t)$ 的相位角，单位是 rad；相位角与信号及其参考之间的**时间偏移**(Δt)有关：

$$\phi=\omega\Delta t \tag{2-42}$$

正相角意味着**超前**波形(即在时间轴上较早出现)，负相角意味着**滞后**波形(即在时间轴上较晚出现)。波形**周期** T 是交流信号变化一周所用的时间。信号的频率是以赫兹(Hz)为单位的，它与周期和角频率的关系：

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \tag{2-43}$$

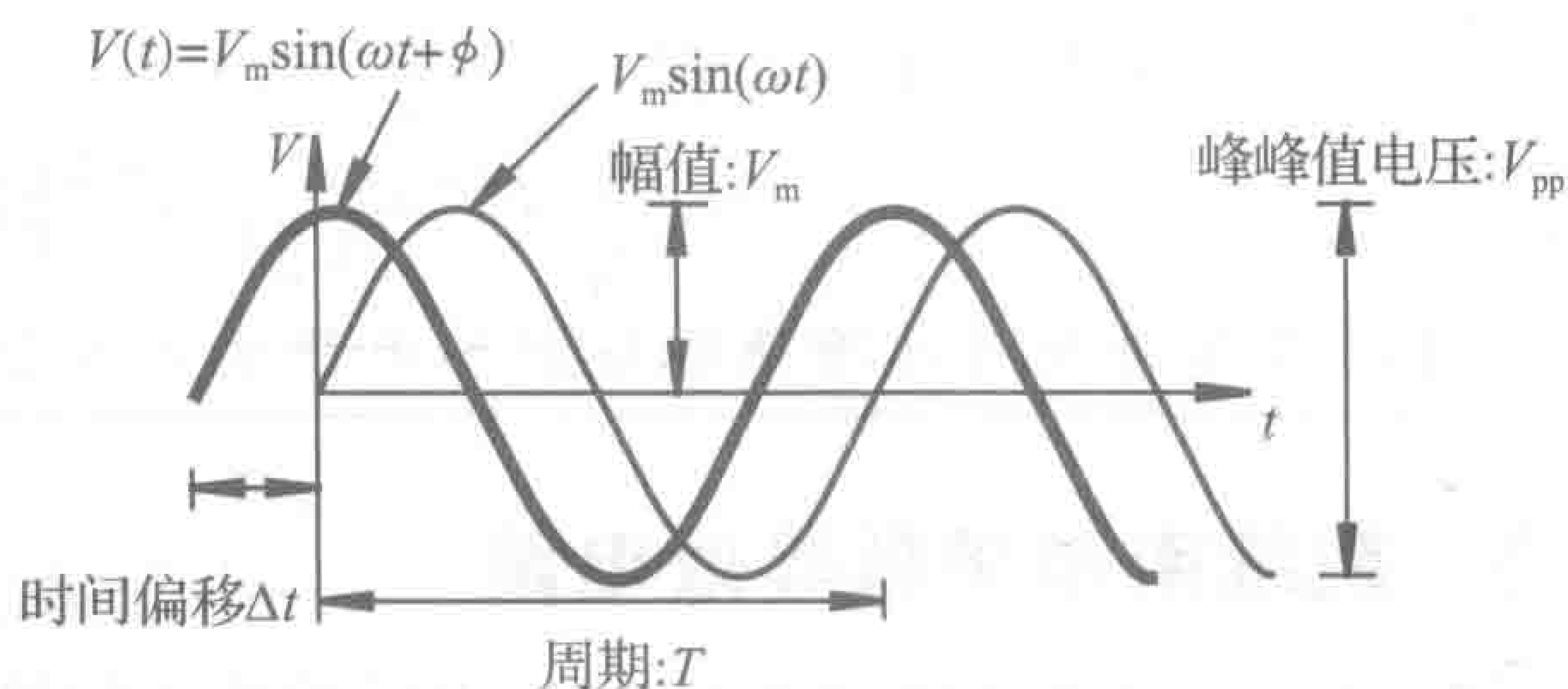


图 2-28　正弦波形

图 2-29 说明了**直流偏移**是正弦波形的另一个重要参数，它表示与参考正弦波的垂直位移。在数学上，直流偏移由 V_{dc} 表示：

$$V(t)=V_{dc}+V_m\sin(\omega t+\phi) \tag{2-44}$$

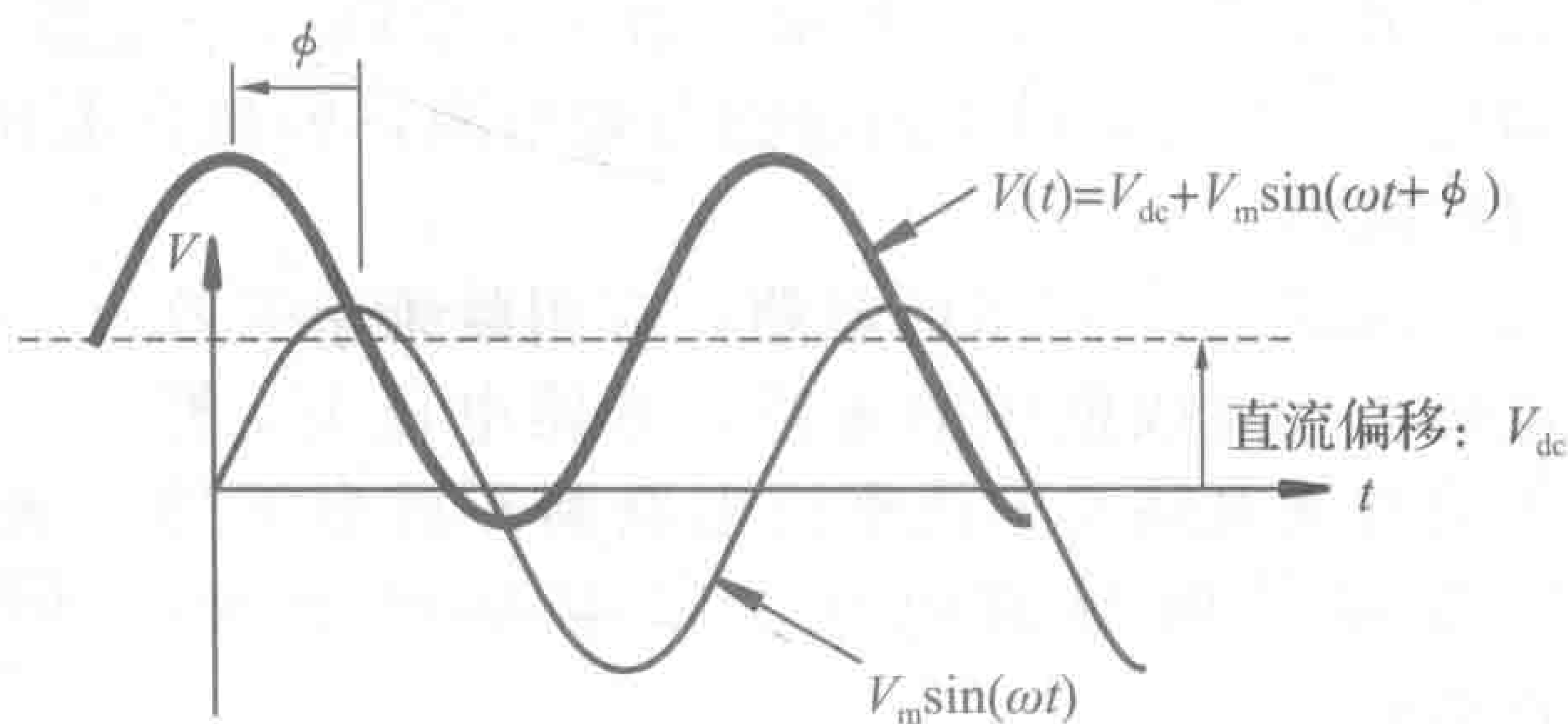


图 2-29　正弦波的直流偏移

图 2-28 和图 2-29 显示了正相位角(ϕ)，其中电压信号 $V(t)$ 超前于参考正弦波。

例 2.6　**交流信号的参数**

该实例介绍了如何确定交流信号的参数，考虑如下的交流电压信号：

$$V(t)=5.00\sin(t-1)\text{V}$$

信号幅值为：

$$V_m = 5.00\text{V}$$

信号的角频率为：

$$\omega = 1.00\text{rad/s}$$

ω 是正弦信号自变量中时间变量 t 的系数。同样，以 Hz 为单位的频率为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\text{Hz} = 0.159\text{Hz}$$

相位角是：

$$\phi = -1\text{rad} = -57.3°$$

负相位表示信号滞后于参考信号 sin(t)(即在时间轴上较晚出现)。为了计算方便，正弦波自变量通常采用弧度来表示。

交流电通常用于一些直流电不可行的场合，使用交流电的主要原因有：

- 交流电易于转换为高电压、低电流的形式，在传输过程中可以最小化功率损耗(见 2.7 节)，这会使长距离传输时效率更高。在住宅区，它可以很容易地转换回所需的电压等级。注意，与源电压的电压等级相比，传输线的压降较小。
- 利用旋转机械(如发电机)容易产生交流电。
- 交流电易于驱动旋转机械(如交流电动机)。
- 交流电源提供固定频率的信号(美国为 60Hz，欧洲为 50Hz)，可用于定时和同步。

课堂讨论项目 2.3　使用交流电的原因

充分解释交流电源为什么在几乎所有的商业和公共事业系统中使用。请参考上面列出的原因。

使用**相量分析**可以简化 AC 电路的稳态分析，相量分析使用复数来表示正弦信号。**欧拉公式**是其数学基础：

$$e^{j(\omega t+\phi)} = \cos(\omega t + \phi) + j\sin(\omega t + \phi) \tag{2-45}$$

其中，$j=\sqrt{-1}$。这意味着正弦信号可以用**复指数**的实分量和虚分量来表示。相对于三角形式，指数形式的数学表达式更易于处理，更方便计算和理解。

AC 电路上电后，如果所有的瞬态分量全部消失，则每个元器件上的电压和电流将以与输入相同的频率 ω 振荡。每个元器件的电压和电流的幅值都是恒定的，但相位可能与输入的不同。这个事实使得在对 AC 电路进行“稳态”分析时，可以将电路中的变量 V 和 I 视为具有幅值 V_m 和 I_m 的复指数形式，其相位角为 ϕ。

相量(如电压 V)用复指数的矢量表示为：

$$V = V_m e^{j(\omega t+\phi)} = V_m\langle\phi\rangle = V_m[\cos(\omega t + \phi) + j\sin(\omega t + \phi)] \tag{2-46}$$

其中，$V_m e^{j(\omega t+\phi)}$ 是复指数形式；$V_m\langle\phi\rangle$ 是**极坐标形式**；$V_m[\cos(\omega t+\phi)+j\sin(\omega t+\phi)]$ 是相量的**复直角坐标形式**。这些量的图形解释显示在图 2-30 所示的复平面上，注意相角 ϕ 是以实轴 ωt 为参考的。

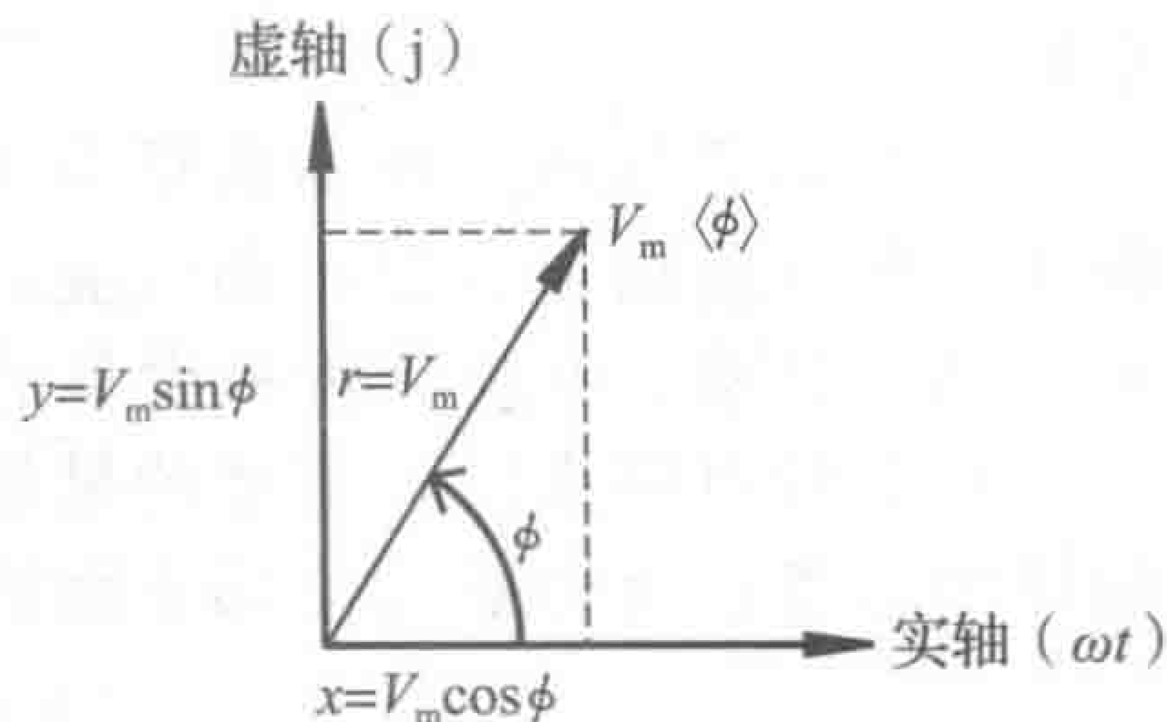


图 2-30　正弦信号的极坐标表示

常用的复数和相量的数学运算关系包括：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2-47}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2-48}$$

$$x = r\cos(\phi) \tag{2-49}$$

$$y = r\sin(\phi) \tag{2-50}$$

$$(x_l + y_l\mathrm{j}) + (x_2 + y_2\mathrm{j}) = (x_l + x_2) + (y_l + y_2)\mathrm{j} \tag{2-51}$$

$$r_1\langle\phi_1\rangle \cdot r_2\langle\phi_2\rangle = r_1 \cdot r_2\langle\phi_1 + \phi_2\rangle \tag{2-52}$$

$$r_1\langle\phi_1\rangle / r_2\langle\phi_2\rangle = r_1/r_2\langle\phi_1 - \phi_2\rangle \tag{2-53}$$

其中，r 是相量的幅值；ϕ 是相量的相角；x 是实分量；y 是虚分量。注意，当从直角坐标转换到极坐标形式，进行反正切函数运算时必须仔细考虑变量(x, y)所处的象限。例如，当 $x=y=-1$ 时，$\phi=-135°$，而不是在计算器或计算机程序中使用 arctan 函数计算时所得到的 45°。

欧姆定律可以推广到由电阻、电容和电感元件组成的交流电路分析中：

$$V = ZI \tag{2-54}$$

其中，Z 为元件的**阻抗**，它是一个复数，可以将 Z 视为一个复杂的、依赖于频率的电阻。阻抗可以使用复指数从元件的基本本构方程中导出。阻抗的单位是欧姆(Ω)。

对于电阻，因为 $V=IR$，所以：

$$Z_R = R \tag{2-55}$$

对于电感，因为 $V=L\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$，如果 $I=I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)}$，则：

$$V = L\mathrm{j}\omega I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)} = (L\mathrm{j}\omega)I \tag{2-56}$$

因此，电感的阻抗为：

$$Z_L = \mathrm{j}\omega L = \omega L\langle 90°\rangle \tag{2-57}$$

这意味着电压超前电流 90°。因为 DC 信号可以认为是零频率$(\omega=0)$的 AC 信号，所以 DC 电路中的电感阻抗为 0，在 DC 电路中电感可视为短路。当交流频率$(\omega=\infty)$很高时，电感具有无穷阻抗，因此它表现为开路。

对于电容，因为 $I=C\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$，如果 $V=V_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)}$，则：

$$I = C\mathrm{j}\omega V_m\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\phi)} = (C\mathrm{j}\omega)V \tag{2-58}$$

得到：

$$V = \left(\frac{1}{C\mathrm{j}\omega}\right)I \tag{2-59}$$

因此，电容的阻抗为：

$$Z_C = \frac{1}{\mathrm{j}\omega C} = \frac{-\mathrm{j}}{\omega C} = \frac{1}{\omega C}\langle -90°\rangle \tag{2-60}$$

这意味着电压滞后电流 90°。在 DC 电路中电容的阻抗$(\omega=0)$是无穷大的，因此可以看成是开路。当交流频率$(\omega=\infty)$很高的情况下，电容具有零阻抗，因此可以把它看成是短路。

如例 2.7 所示，在前面章节中用于分析简单 DC 电路的每个结论，包括欧姆定律、串联和并联电阻组合、分压和分流，都适用于上述的 AC 信号和阻抗分析。网络链接 2.7 是回顾 AC 电路、电路分析和设备的极好资源。

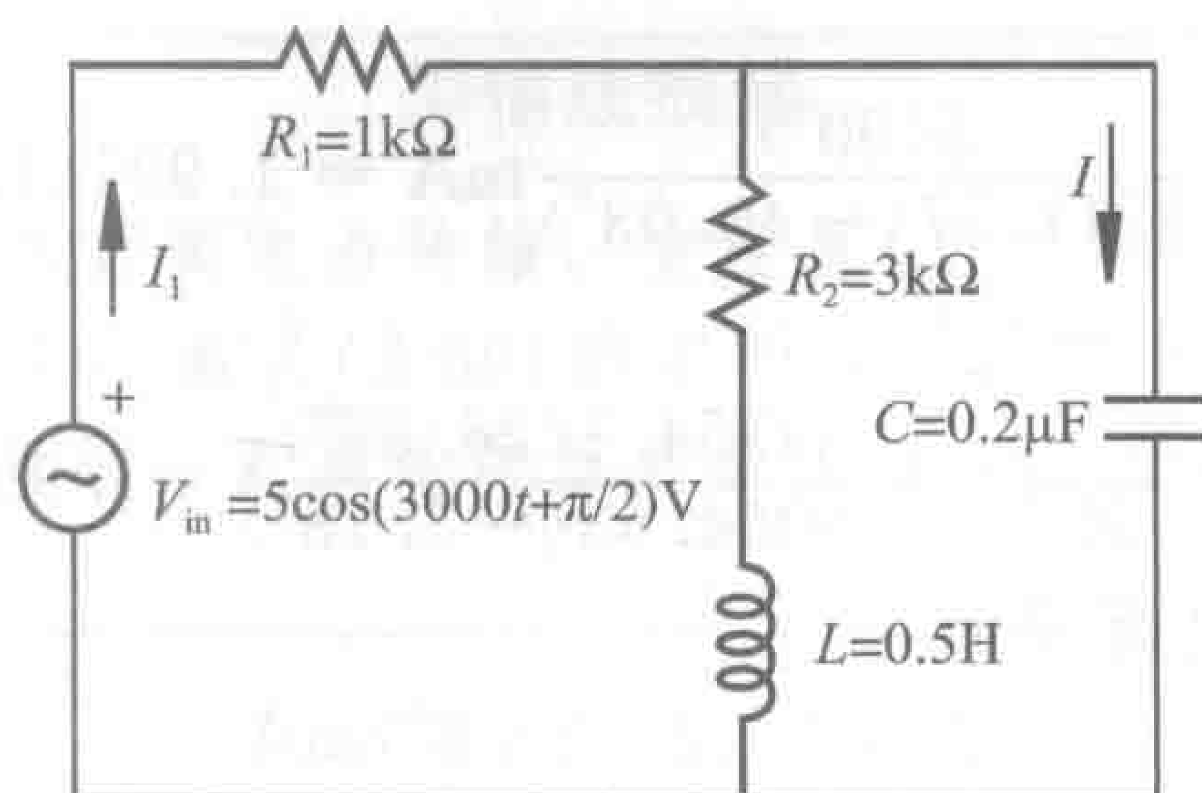
对多源电路来说，重要的是始终以正弦或余弦形式来表示信号，使得其相位关系具有同样的参考。这可通过使用下面的三角恒等式来实现变换：

$$\sin(\omega t + \phi) = \cos(\omega t + \phi - \pi/2) \tag{2-61}$$

$$\cos(\omega t + \phi) = \sin(\omega t + \phi + \pi/2) \tag{2-62}$$

例 2.7　　**交流电路分析**

以下是交流电路分析的实例，目的是求解下面电路中流过电容的稳态电流 I：



因为输入电压源为：

$$V_{in} = 5\cos\left(3000t + \frac{\pi}{2}\right)V$$

所以电路中的每个元器件响应的角频率均为：

$$\omega = 3000\text{rad/s}$$

因为电压源的幅值为 5V，相对于 $\cos(3000t)$ 的相位为 $\pi/2$，所以电压源的相量和复数形式为：

$$V_{in} = 5\langle 90°\rangle V = (0 + 5\text{j})\text{V}$$

电容阻抗的复数和相量形式为：

$$Z_C = -\text{j}/\omega C = -1666.67\text{j}\Omega = 1666.67\langle -90°\rangle\Omega$$

电感阻抗的复数和相量形式：

$$Z_L = \text{j}\omega L = 1500\text{j}\Omega = 1500\langle 90°\rangle\Omega$$

首先计算流过整个电路的电流(I_1)，然后使用分流法确定流过电容的电流(I)。为此，需要确定中间支路的阻抗，以及整个电路的等效阻抗。

电阻 R_2 和电感 L 串联，根据式(2-47)和式(2-48)，R_2 和 L 串联阻抗的极坐标和相量形式为：

$$R_2 + Z_L = (3000 + 1500\text{j})\Omega = 3354.1\langle 26.57°\rangle\Omega$$

该阻抗与电容器 C 并联，由式(2-33)，可以获得并联后的等效阻抗为：

$$\frac{(R_2 + Z_L)Z_C}{(R_2 + Z_L) + Z_C}$$

根据式(2-52)，计算上式中的分子：

$$(R_2 + Z_L)Z_C = 3354.1\langle 26.57°\rangle \cdot 1666.67\langle -90°\rangle\Omega = 5\,590\,180\langle -63.43°\rangle\Omega$$

根据式(2-51)，计算上式中的分母：

$$(R_2 + Z_L) + Z_C = [(3000 + 1500\text{j}) - 1666.67\text{j}]\Omega = (3000 - 166.67\text{j})\Omega$$

根据式(2-47)和式(2-48)，分母的相量形式为：

$$(R_2 + Z_L) + Z_C = (3000 - 166.67\text{j})\Omega = 3004.63\langle -3.18°\rangle\Omega$$

因此，根据式(2-53)，(R_2+Z_L)和 Z_C 的并联阻抗为：

$$\frac{(R_2 + Z_L)Z_C}{(R_2 + Z_L) + Z_C} = \frac{5\,590\,180\langle -63.43°\rangle}{6004.63\langle -3.18°\rangle}\Omega = 1860.52\langle -60.25°\rangle\Omega$$

根据式(2-49)和式(2-50)可知，上述阻抗的直角坐标形式为：

$$\frac{(R_2 + Z_L)Z_C}{(R_2 + Z_L) + Z_C} = 1860.52\langle -60.25°\rangle\Omega = (923.22 - 1615.30\text{j})\Omega$$

该阻抗与电阻 R_1 串联，因此整个电路的等效阻抗为：

$$Z_{eq} = R_1 + \frac{(R_2 + Z_L)Z_C}{(R_2 + Z_L) + Z_C} = 1000\Omega + (923.22 - 1615.30\text{j})\Omega = 1923.22 - 1615.30\text{j}\Omega$$

根据式(2-47)和式(2-48)可知，上述阻抗的相量形式为：

$$Z_{eq} = (1923.22 - 1615.30\text{j})\Omega = 2511.57\langle -40.03°\rangle\Omega$$

由欧姆定律，计算得到 I_1：

$$I_1 = \frac{V_{in}}{Z_{eq}} = \frac{5\langle 90°\rangle}{2511.57\langle -40.03°\rangle}\text{mA} = 1.991\langle 130.09°\rangle\text{mA}$$

应用分流公式可得：

$$I = \frac{(R_2 + Z_L)}{(R_2 + Z_L) + Z_C} I_1 = \frac{3354.1\langle 26.57°\rangle}{3004.63\langle -3.18°\rangle} \cdot 1.991\langle 130.03°\rangle\text{mA}$$

利用式(2-52)和式(2-53)，计算得到：

$$I = 2.22\langle 159.8°\rangle\text{mA}$$

所以，电容电流超前参考输入 159.8°或者 2.789rad，即电流：

$$I(t) = 2.22\cos(3000t + 2.879)\text{mA}$$

注意，如果输入电压是 $V_{in} = 5\sin(3000t + \pi/2)$ V，则产生的电流为 $I(t) = 2.22\sin(3000t + 2.789)$mA。但在本实例中参考信号为 $\cos(3000t)$。

MathCAD Example 2.1 在软件中执行了上述所有分析。相量可以用极坐标或直角坐标的形式输入或显示，所有计算均可轻松完成。如果不熟悉 MathCAD，可以观看视频演示 2.9，该视频介绍和演示了软件的应用及其功能。

2.7 电路中的功率

所有电路元器件通过电荷和电磁场之间的物理作用来消耗、存储或输送能量。可以通过考察无穷小电荷(dq)在电场中移动导致电势变化(由电压 V 表示)时所做的无穷小功(dW)来推导出功率的表达式。该无限小的功由下式来表示：

$$dW = V dq \tag{2-63}$$

做功的速率称为**功率**，定义为：

$$P = \frac{dW}{dt} = V\frac{dq}{dt} = VI \tag{2-64}$$

因此，元件消耗或产生的功率是通过元件的电压和电流的乘积。如果电流沿着电压下降的方向流动，如图 2-31 所示，则 P 是负的，这意味着该元件消耗或存储能量。如果电流沿电压增加的方向流动，则 P 是正的，这意味着该元件正在产生或释放能量。电阻电路中的瞬时功率可以表示为：

$$P = VI = I^2R = V^2/R \tag{2-65}$$

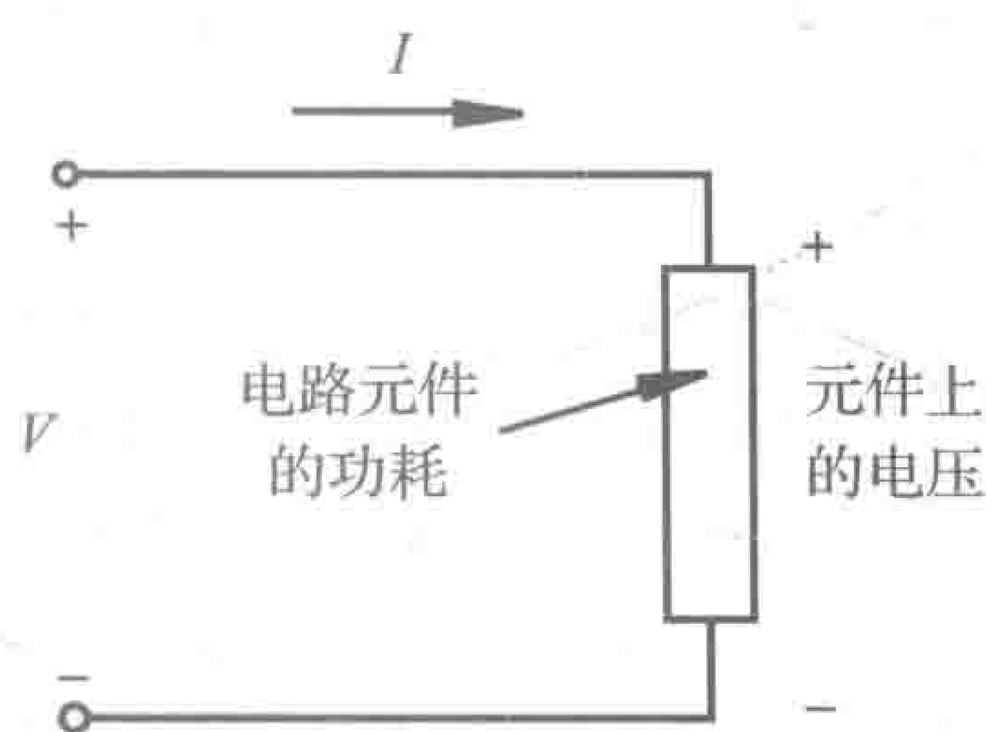


图 2-31 电路元件的功耗

对于 AC 信号，因为 $V = V_m\sin(\omega t + \phi_V)$ 和 $I = I_m\sin(\omega t + \phi_I)$，所以功率在 AC 波形的周期上连续改变。瞬时功率本身不是有用的量，但如果考察一个周期内的平均功率，就要很好地测量电路或元件的整体功率特性了。一个周期内的平均功率(见问题 2.42)为：

$$P_{avg} = \frac{V_m I_m}{2}\cos(\theta) \tag{2-66}$$

其中，θ 是电压和电流之间的相位差($\phi_V - \phi_I$)，也是复阻抗 $Z = V/I$ 的相位角。

如果定义电压和电流的**有效值**为：

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2 dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{2-67}$$

则电阻消耗的平均交流功率可以用与直流电路相同的形式来表示(见问题 2.43)：

$$P_{avg} = V_{rms}I_{rms} = RI_{rms}^2 = V_{rms}^2/R \tag{2-68}$$

课堂讨论项目2.4　**传输线损耗**

发电厂采用高压线实现远距离电力传输。变压器(见2.8节)用于改变传输前后的电压等级。因为高电压下电流较小，由式(2-65)的中间表达式可知，传输时的功率损耗较小。但由式(2-65)最后的表达式可知，更高的电压意味着更大的功率损耗？如何解释这个明显的差异？

课堂讨论项目2.5　**国际交流电标准**

在欧洲，家用交流电信号在50Hz时为220V_{rms}。如果在美国购买的电气设备，如电动剃须刀，在欧洲使用时会有什么影响？

对于除了电阻以外还有电感和电容的AC网络，根据式(2-66)和式(2-67)可知，网络消耗的平均功率可以表示为：

$$P_{avg}=I_{rms}V_{rms}\cos\theta=I_{rms}^2|Z|\cos\theta=\left(V_{rms}^2/Z\right)\cos\theta \tag{2-69}$$

其中，$|Z|$是复阻抗的幅值；$\cos\theta$为**功率因数**，因为网络消耗的平均功率取决于此项。

课堂讨论项目2.6　**交流电线路波形**

画出典型家用墙壁插座的一个周期的交流电压信号波形，说明电压的幅值、频率、周期和有效值是多少？此外，家用电路的典型有效值电流是多少？

2.8　变压器

变压器是用于改变AC电路中电压和电流相对幅值的装置。它由一次和二次绕组组成，其磁通量由铁磁心连接，如图2-32所示。

视频演示2.10显示了一个实际变压器的例子，视频中给出了一个具有叠片铁心和壳式电源的变压器。

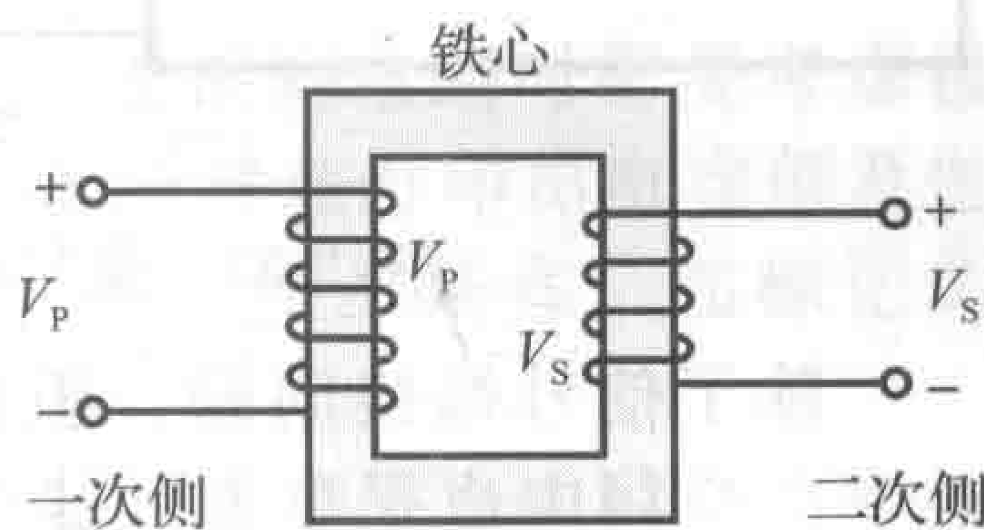


图2-32　变压器

根据法拉第感应定律并忽略磁损耗，因为绕组通过相同的交变磁通量，所以对于一次和二次绕组来说每匝导线上的电压是相同的。故此，一次和二次电压(V_P和V_S)的关系为：

$$\frac{V_P}{N_P}=\frac{V_S}{N_S}=-\frac{d\phi}{dt} \tag{2-70}$$

其中，N_P是一次绕组的匝数；N_S是二次绕组的匝数；ϕ是两线圈之间连接的磁通量。因此，二次电压可用一次电压表示为：

$$V_S=\frac{N_S}{N_P}V_P \tag{2-71}$$

其中，N_S/N_P是变压器的匝数比。如果$N_S>N_P$，则变压器称为**升压变压器**，因为电压增加。如果$N_S<N_P$，则称为**降压变压器**，因为电压降低。如果$N_S=N_P$，则称为**隔离变压器**，其输出电压等于输入电压。所有变压器的输出电路与输入电路均为电气隔离。

如果忽略由于绕组电阻和磁效应在变压器中产生的损耗，则一次和二次电路功率是相等的：

$$I_PV_P=I_SV_S \tag{2-72}$$

将上式代入式(2-71)，则二次电流和一次电流之间有以下关系：

$$I_S = \frac{N_P}{N_S} I_P \tag{2-73}$$

因此，升压变压器会在二次侧产生较低电流，而降压变压器会在二次侧产生较高电流。隔离变压器在一次和二次侧具有相等的交流电流。请注意，变压器的一次电压或电流的任何直流分量都不会出现在二次侧。只有交流电流能够被转换。

课堂讨论项目 2.7　　直流变压器

可以使用变压器来增加直流电路中的电压吗？为什么可以或为什么不可以？

2.9 阻抗匹配

当将不同的设备和电路连接在一起时，通常必须要注意。例如，当使用某些函数发生器来驱动电路时，可能需要图 2-33 所示的适当的**信号端接**形式或负载。图中，50Ω 的终端电阻与有较高阻抗的电路网络相并联，这有助于匹配接收网络的输入阻抗与函数发生器的输出阻抗，这称为**阻抗匹配**。如果阻抗不匹配，则高阻抗网络将反射驱动电路（如函数发生器）的频率分量，特别是高频分量。一个很好的例子是一根细绳连接到一根较粗的绳子上，如图 2-34 所示，如果以细绳端作为振动源传播横向振动，则一部分振动会传输到粗绳端，同时还有一部分会反射回细绳端，这就是两个绳子连接处粗细不匹配造成的后果。

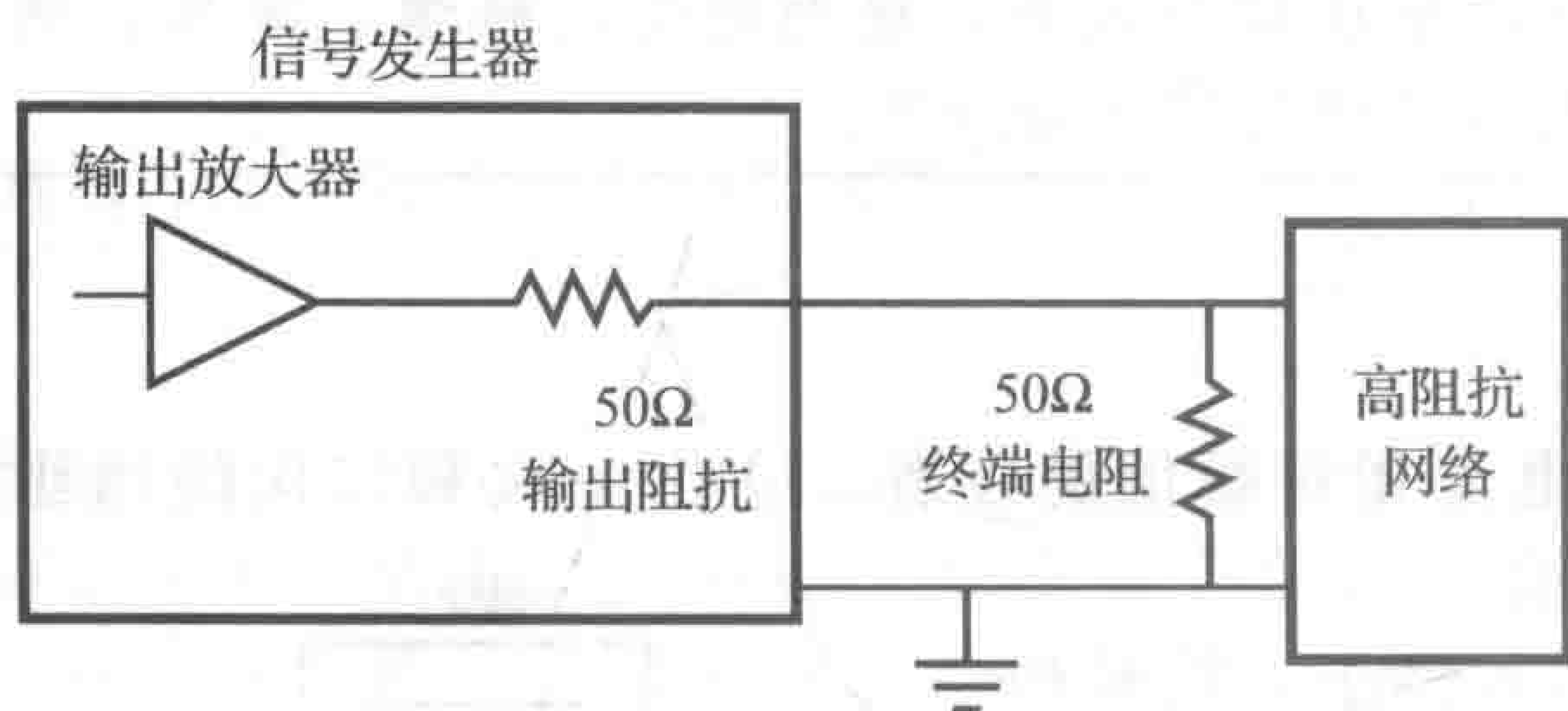


图 2-33　信号端接

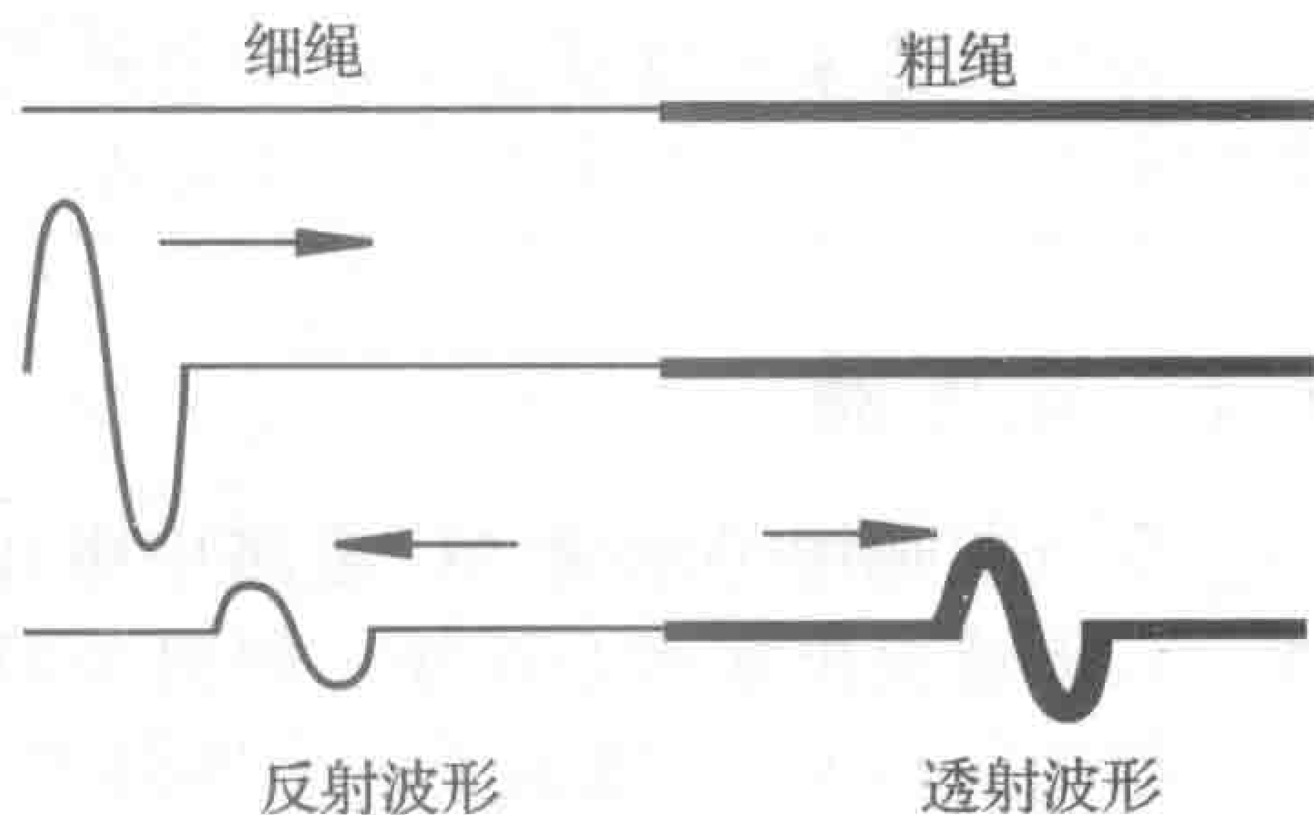


图 2-34　阻抗不匹配——绳子类比

除了信号端接问题，阻抗匹配在从源向负载传输最大功率的应用中也很重要。这个概念可以由图 2-35 所示的简单电阻电路来说明，其中源电压为 V_s，源输出阻抗为 R_s 和负载电阻为 R_L。负载两端的电压可以根据分压原理得到：

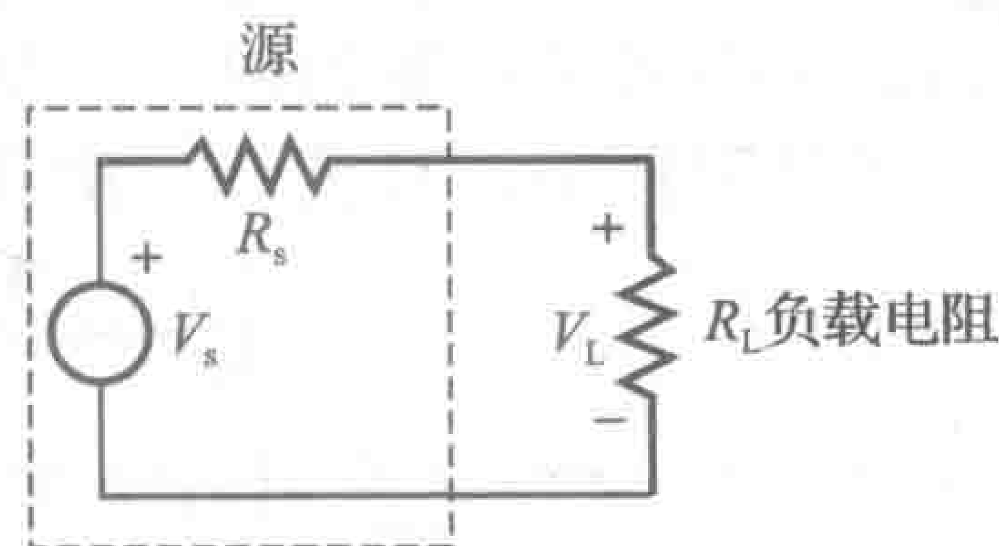


图 2-35　阻抗匹配

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R_s} V_s \tag{2-74}$$

因此，传输到负载上的功率为：

$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{R_L}{(R_L + R_s)^2} V_s^2 \tag{2-75}$$

为了找到使该功率最大的负载电阻，令功率的导数等于 0，并求解负载电阻：

$$\frac{\mathrm{d}P_L}{\mathrm{d}R_L} = V_s^2 \frac{(R_L + R_s)^2 - 2R_L(R_L + R_s)}{(R_L + R_s)^4} = 0 \tag{2-76}$$

只有当分子为 0 时，导数为 0，所以：

$$(R_L + R_s)^2 = 2R_L(R_L + R_s) \tag{2-77}$$

可以求得 R_L 为：

$$R_L = R_s \tag{2-78}$$

可以利用功率的二阶导数来验证该结果导致功率最大而非最小。分析结论是：为了使得传输到负载上的功率最大化，负载阻抗应该匹配源阻抗。

课堂讨论项目 2.8 **音频立体声放大器阻抗**

为什么选择扬声器时音频立体声放大器的输出阻抗是重要的指标？

课堂讨论项目 2.9 **电气元件的常用功能**

根据经验，列举以下电气元件的应用场合和如何使用的实例：

- 电池
- 电阻
- 电容
- 电感
- 分压器
- 变压器

2.10 注意事项

本章前述内容已经介绍了基本电路的所有原理和理论。最后一节将介绍在搭建一个功能正常和可靠的电路时需要考虑的各种实际问题。本书附带的实验练习教材(见mechatronics. colostate. edu/lab_book. html)提供了一些有用的经验，可以帮助开发样机和测量技能。本节提供一些额外的支撑信息。

2.10.1 电容信息

在2.2.1节可以看到，确定分立电阻元件的电阻值非常容易，只要查找颜色表中对应的数值即可确定电阻值。但是，电容的标识并不那么直接。

电容有时用“cap”表示，大电容通常是电解型的，所以它连接到电路时需要考虑极性。因为大电容器具有大的封装尺寸，所以制造商通常在封装上清楚地打印出电容值及电容单位的首字母。需要注意的是大写字母M，通常用来表示微，而不是兆。如标记为“+500MF”的电解电容表示的是500μF的电容。

注意电解电容的极性非常重要，该类型电容的内部结构不对称，如果在电路中将电容极性接反了，则可能会烧毁电容，标记“+”端处的电压必须比另一端电压高。有时，违反这个原则会导致电容内部形成气体，并导致其爆炸。另外，不正确的极性连接也可能导致电容短路。

随着电容尺寸变小，确定电容值变得更加困难。钽电容是银色圆柱体，具有极性：“+”号或者一个金属接头标识为正极。如标识+4R7m，只要知道“R”用来标识小数点的位置，则就可以知道+4R7m表示4.7mF(毫法)的电容。同样的电容也可以标记为475K，注意这不代表475kF，这里的“K”是公差标识，而不是单位的前缀，“K”表示±10%(见下文)。电容值通常用法拉量级表示时数值很小，容值通常在微法($1\mu F=10^{-6}F$)至皮法($1pF=10^{-12}F$)范围内。钽电容上的标签与电阻编码系统类似：475表示47×10^5，并且约定其单位为pF。通常，如果电容的数值表示为分数(例如，0.01)，则单位前缀几乎都是微法(μF)，如果该值是一个大的整数(例如，47×10^5)，则单位为pF。前缀n($1nF=10^{-9}F$)通常不用于表示电容值。回到之前的例子，标记为“475”的钽电容容值一定是47×10^5pF，即4.7×10^6pF、4.7×10^{-6}F或者4.7μF。

聚酯薄膜电容通常是黄色圆柱状的，其标识很清晰，如“.01M”表示容值为0.01μF。聚酯薄膜电容没有极性，可以以任意方向将其接入电路。聚酯薄膜电容由很长的金属箔线圈绕制而成(由聚酯薄膜电介质隔开，这也是其名称的由来)，它在非常高的工作频率下将失去电容的功能，因为此时线圈的电感分量变得十分显著，这将阻止高频分量的通过。接下来描述的陶瓷电容在这方面具有更好的性能，虽然它们在其他特性方面非常差。

陶瓷电容呈扁平的圆形(类似薄饼)，通常是橙色的。因为它们的形状和结构与绕制的聚酯薄膜相反，所以即使在高工作频率下，其特性仍然是容性的。注意陶瓷电容的标识符号有可能被误解为单位，例如，标有“Z5U.02M1kV”陶瓷电容容值为0.02μF，最大额定电压为1kV，此处M是一个公差标记，表示±20%。

CK05电容的形状像一个小的盒子，其引脚间隔为0.2in(1in=0.0254m)，可以很容易地插入原型样机或印制电路板中，因而很常用。如前所述，其标识如101K，表示100pF(10×10^1pF)。

表2-3 电容和电阻的公差代码

编码字母	含义
Z	+80%，-20%(电容)，±0.025%(精密电阻)
M	±20%
K	±10%
J	±5%
G	±2%
F	±1%
D	±0.5%
C	±0.25%
B	±0.1%
N	±0.02%
A	±0.005%

表2-3列出了电容上常出现的公差代码，这些代码适用于带有印刷标识的电容器和电阻器。请注意，Z代码在电阻上表示的公差非常小，但是在电容上表示的公差很大。

在电容器实际使用时应考虑更多信息，参见网络链接2.8。

2.10.2 面包板和原型建议

面包板是一种可以很方便地应用于原型电路开发的设备，它可以很容易地测试和修改电路。图2-36显示了一个典型的面包板布局，包括一个间隔为0.1in的插入接点矩形矩阵。如图中箭头所示，a至e、f至j对应的每一列其接点在内部互连。在面包板的顶部和底部边缘标识有“+”和“-”的每一行接点在内部也相互连接，这样便于提供直流电压和接地线。从图中可以看出，集成电路(IC或“芯片”)通常跨越列a至e、f至j之间的间

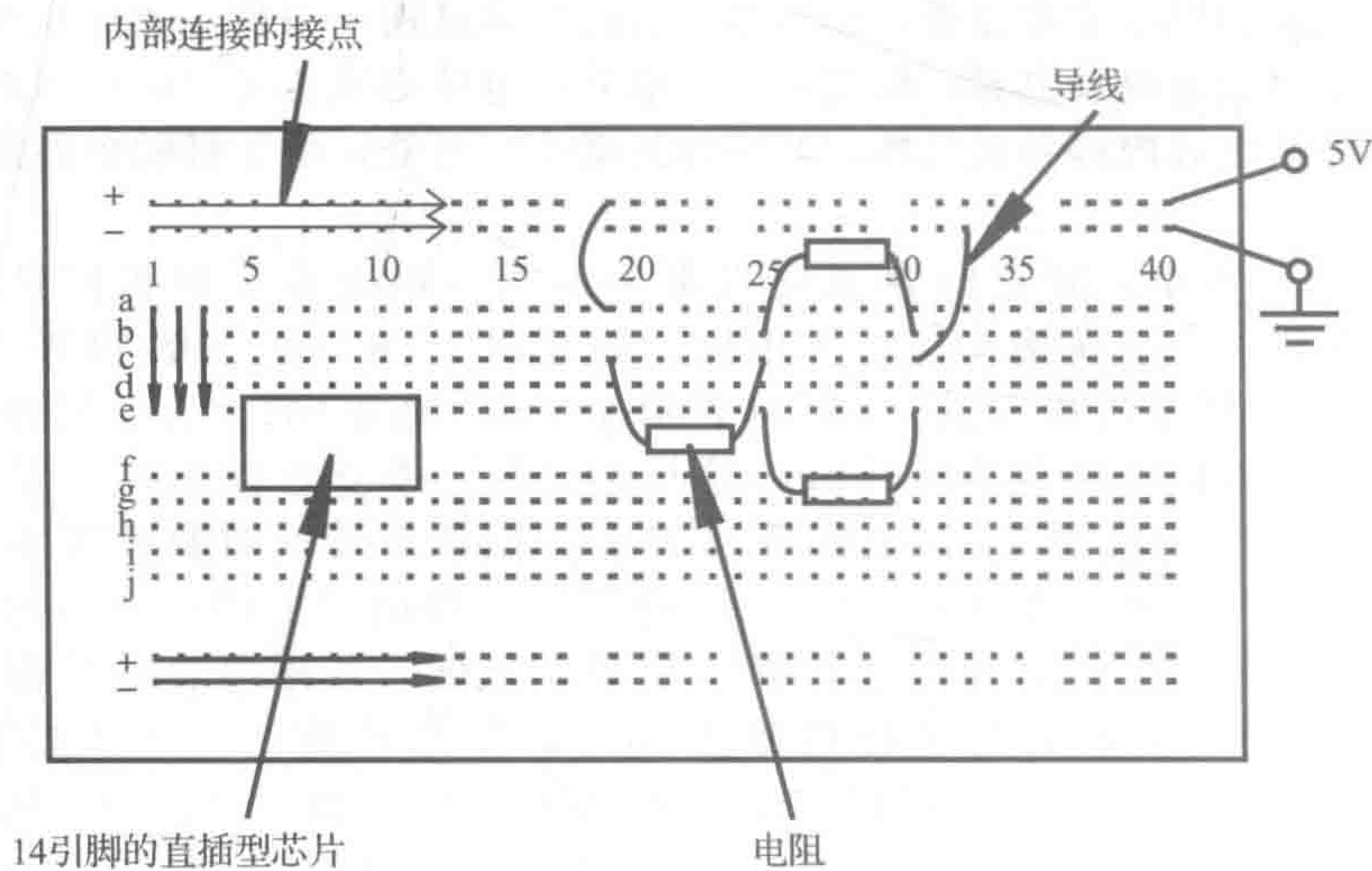


图2-36 面包板

隙插入面包板，图中显示了一个14引脚双列直插封装(DIP)IC，当IC跨越间隙放置时，IC的每个引脚连接到单独的编号列上，这样可以很容易地用电线连接至或引出IC引脚。图中同时给出了一个简单的电阻电路连接的例子，其原理图如图2-37所示。测量电压V_1和电流I_3的方法将在2.10.3节介绍。图2-38显示了包括电阻、集成电路和按钮开关的已连线的面包板电路示例，当构建这样的电路时，应当小心地修整引线，使得元件有序地位于面包板上，以便以后可以更容易地看清连线，发现潜在的问题和错误。

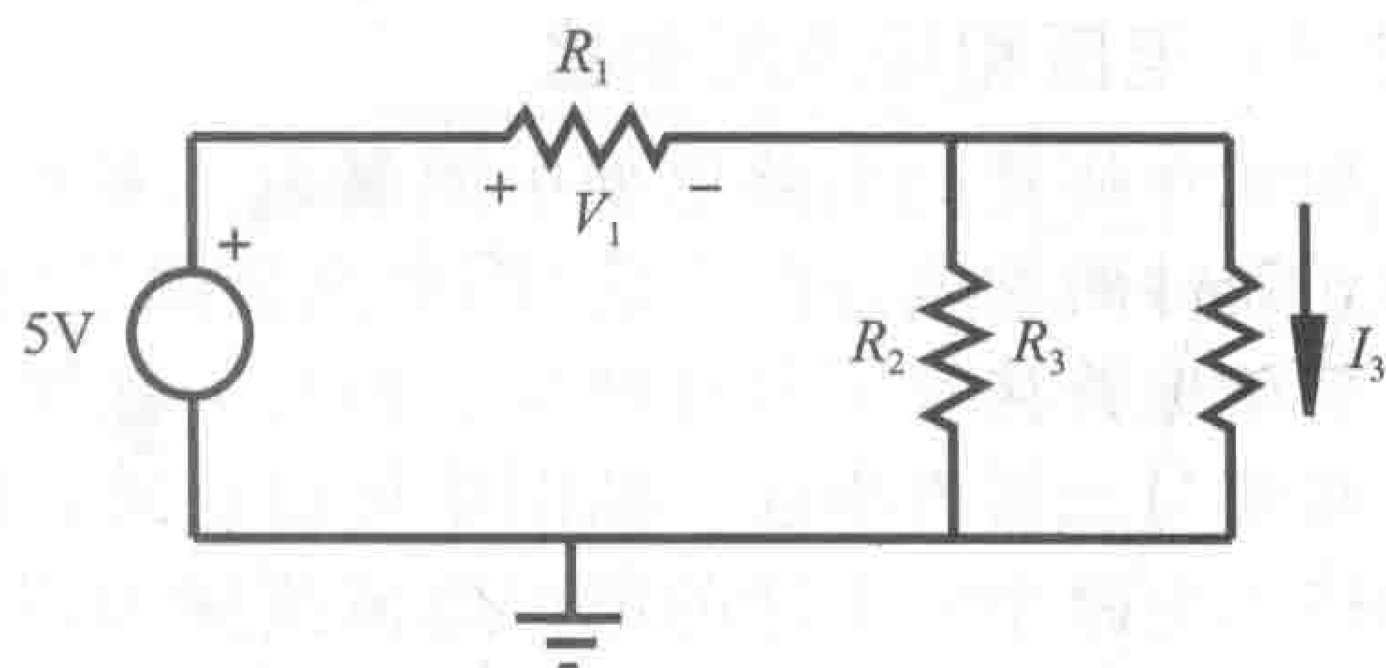
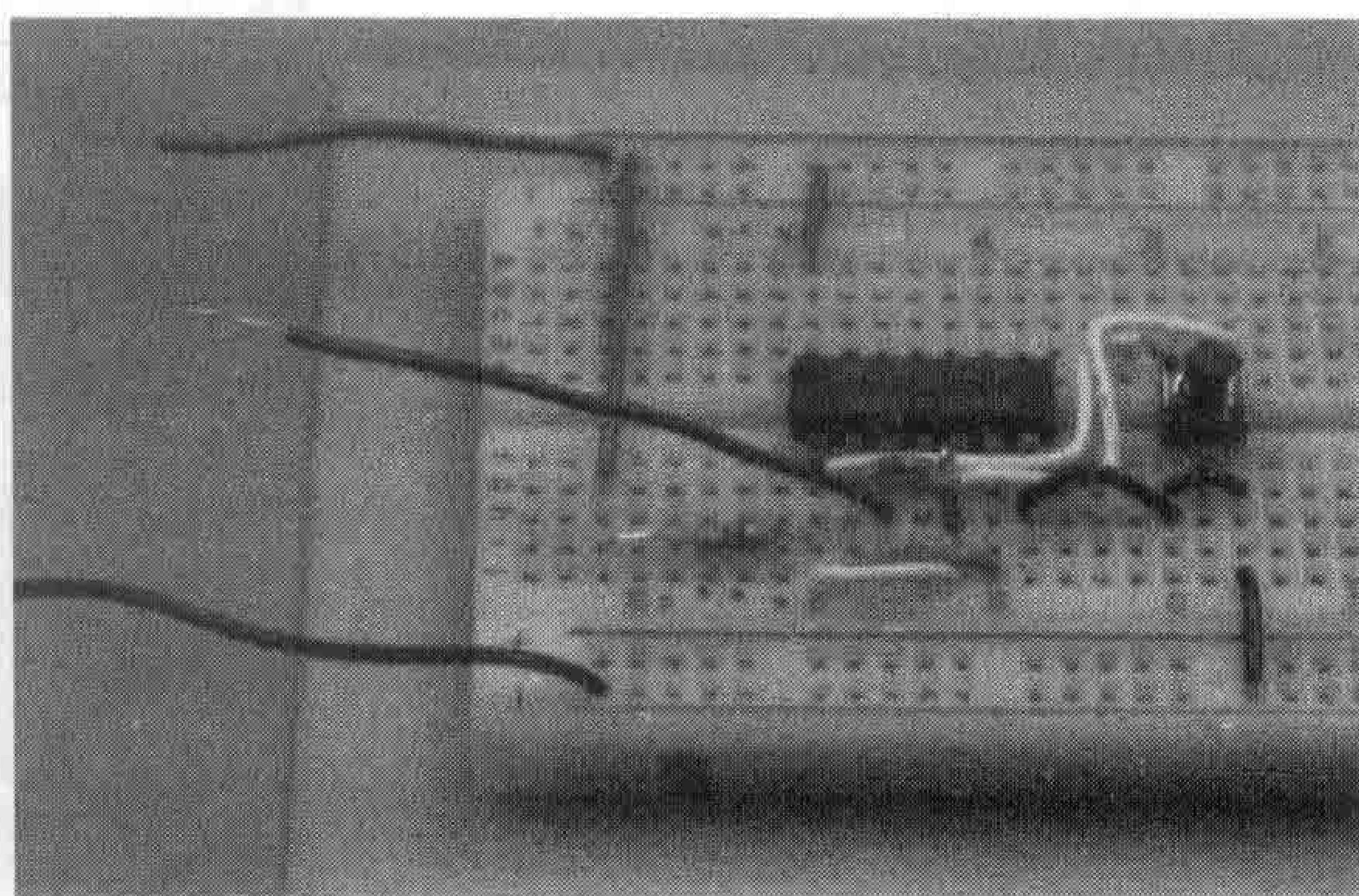


图2-37 电阻电路示意图

视频演示2.11显示了如何构建面包板，视频演示2.12提供了如何在面包板上正确组装电路的“经验法则”。网络链接2.9是一个很好的资源，提供了应用面包板(无须焊接的原型板)、穿孔板(需焊接的原型板)开发原型电路和设计定稿时应用印制电路板(PCB)的有用提示。


图2-38 面包板电路示意图

以下是当使用面包板搭建电路(包含集成电路)时应遵循的一套基本准则。一般来说，如果你仔细遵循了这个协议，将会节省大量的时间，避免很多的错误：

1. 首先需要一份清晰的原理图，它应包含所有元器件、输入、输出和连接关系。

2. 根据元器件数据手册中有关引脚分布的信息绘制详细的接线图。对每个IC引脚进行标识和编号，用于指导随后的布线。

3. 仔细检查每个元器件要执行的功能并单独测试它们。

4. 将IC插入面包板上。

5. 在面包板上插入每根导线时，应检查并突出标记原理图上对应的连线，小心地连接所有的导线。以一种有意义的方式选择导线的颜色(例如，红色为+5V，黑色为地，其他颜色为信号)，并裸露导线的末端(约1/4in)。如果裸露的太短，可能无法建立良好的连接；如果太长，可能存在损坏面包板和短路的风险。还要注意不要让插入的元器件(例如，电阻和电容)离面包板孔距离太远，这也可能导致面包板损坏或短路问题。

6. 操作面包板时动作需要轻柔，尽量不要用力地插拔导线。用力过大可能会导致面包板损坏，可能将无法在损坏的孔或行中建立可靠的连接了。使用“芯片拔出器”(小工具)从面包板上取下IC，以防造成芯片引脚弯曲或断裂。

7. 确保布线整洁，并保持所有的导线尽可能短，以最小化电磁干扰(EMI)和附加的电阻、电感和电容。

8. 确保面包板中所有元器件和导线安装牢固，并建立良好的连接状态，这对于像PIC微控制器这样大型IC是很重要的。

9. 重复检查每个IC的供电(如+5V)和接地。

10. 在电源连接之前，将输出设置为+5V并将其关闭。

11. 将电源连接到面包板，然后将其打开。

12. 测量输入和输出处的信号以验证功能是否正常。

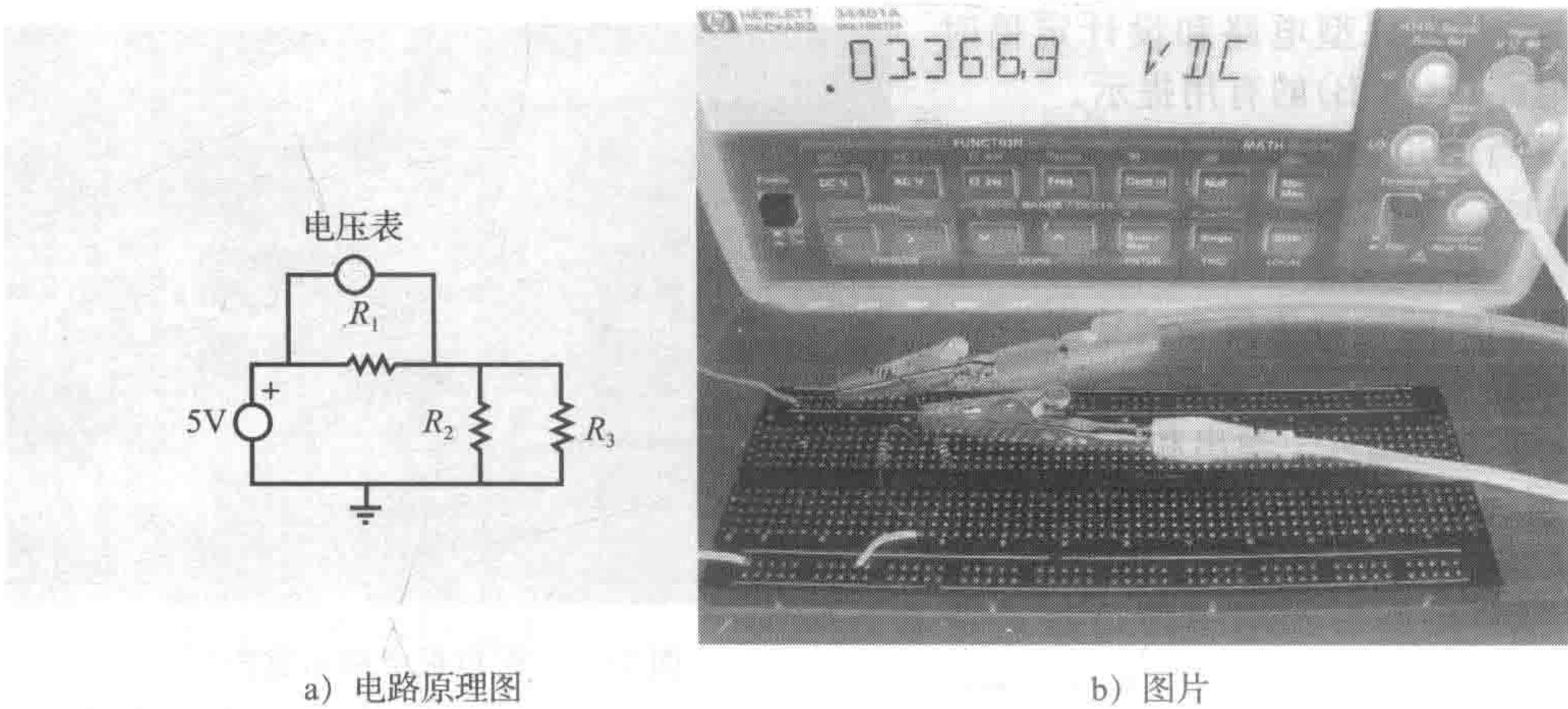
13. 如果您的电路不能正常工作，请按照相反的顺序返回上述步骤仔细检查。如果还

不正常，请使用万用表上的蜂鸣检查功能来验证所有线路的连接情况并检查是否有短路（请参阅视频演示 2.13）。

14. 当使用焊接原型板或 PCB 进行电路设计时，请使用 IC 插座，以便于安装和拆卸 IC。

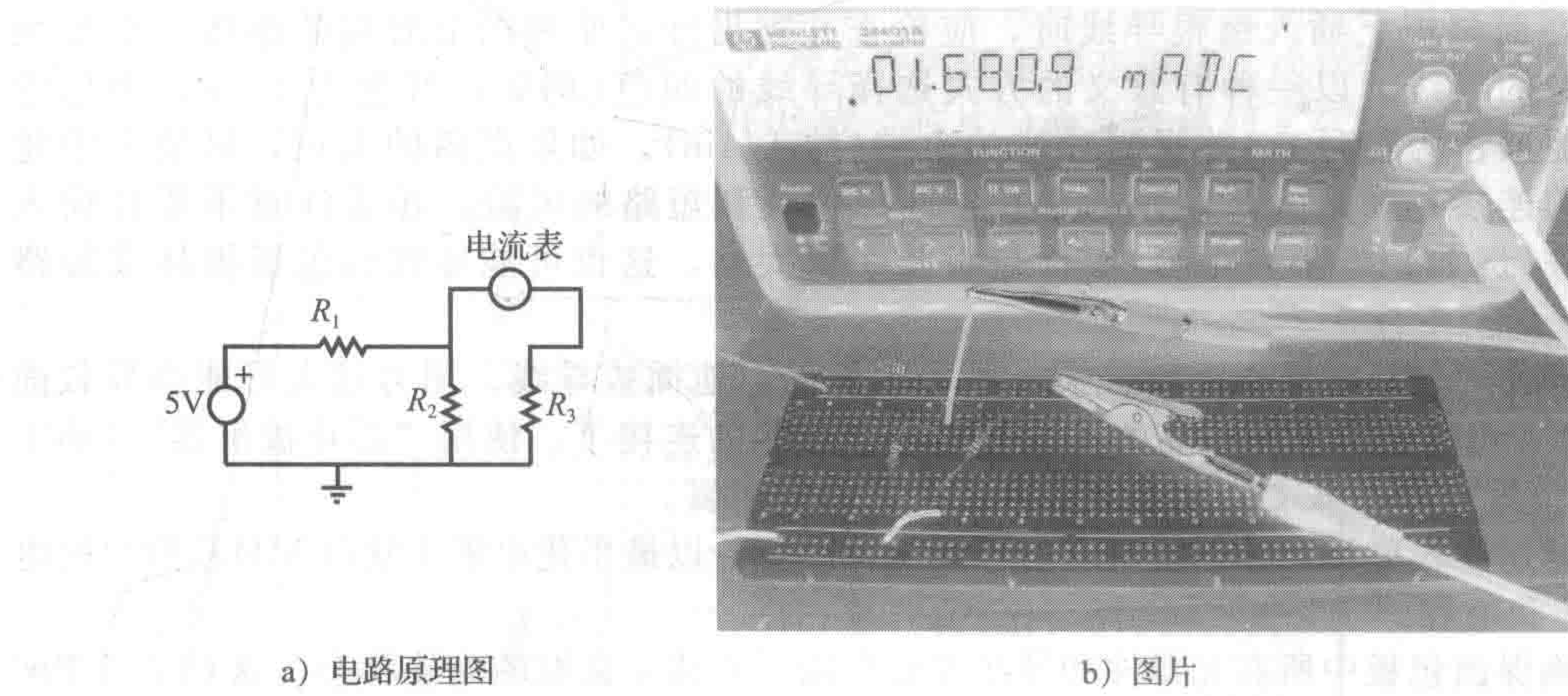
2.10.3 电压和电流的测量

如何在搭建的电路原型中测量电压和电流是至关重要的，图 2-39 给出了如何测量电路中元器件两端电压的方法(图中测量的是电阻两端的电压)。为了测量电压，电压表的引线应简单地跨接在元器件两端。但是，如图 2-40 所示，当测量通过元器件的电流时，电流表必须与元器件串联。从图中可以看出，需要移出电阻 R_3 的一端引线，用以将电流表串联接入电路中。上述的电压电流测量可以在视频演示 2.13 中找到。了解输入阻抗的影响也很重要，特别是在测量大电阻两端的电压或测量流过低电阻支路的电流时(参见 2.4 节了解更多信息)。



a）电路原理图　　b）图片

图 2-39　测量电压



a）电路原理图　　b）图片

图 2-40　测量电流

2.10.4 焊接

一旦电路已经在面包板上测试好了，就可以通过使用**原型板**(也称为穿孔板或矢量板)焊接元器件和电路连线来创建永久原型。这些板由间隔为 0.1in 的孔矩阵组成，这和面包板中插入点间距一样。但是与面包板不同的是孔之间没有预接线连接，所有连接必须使用

外部导线和焊接点完成。这样的电路板非常坚固和可靠。

当需要多个电路原型或电路产品时，通常采用**印制电路板**(PCB)。此时，元器件插入并焊接到板上的穿孔中，并且元器件之间的所有连接用导电介质“印制”在板上。有关PCB及其制作方法的更多信息，请参阅网络链接2.10和2.11。

焊料是锡、铅和具有低熔点(约375℉，1℉=5/9℃)的其他材料的金属合金。焊料通常为线状，焊线中心带有助焊剂芯，有助于焊料熔化、增强金属表面的润湿并防止氧化。焊料由加热尖端和支撑手柄组成的烙铁进行焊接(参见图2-41)。一些烙铁还包括控制尖端温度的变阻器。使用烙铁时，请确保尖头安装牢固。此外，加热后，确保尖端干净、有光泽，如果需要，用湿海绵或钢丝棉擦拭它。

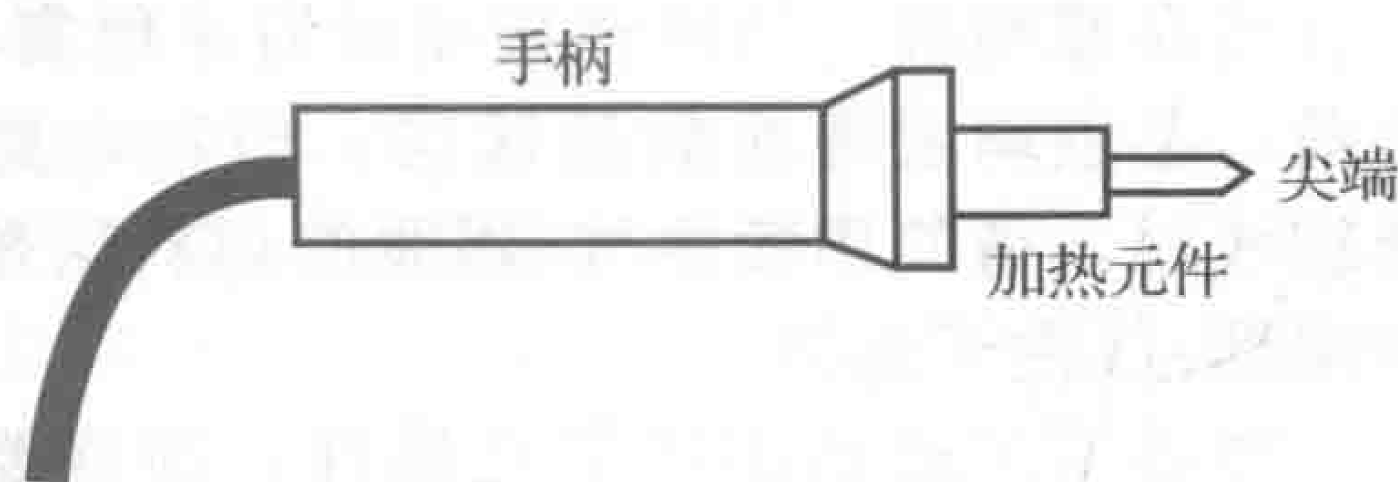


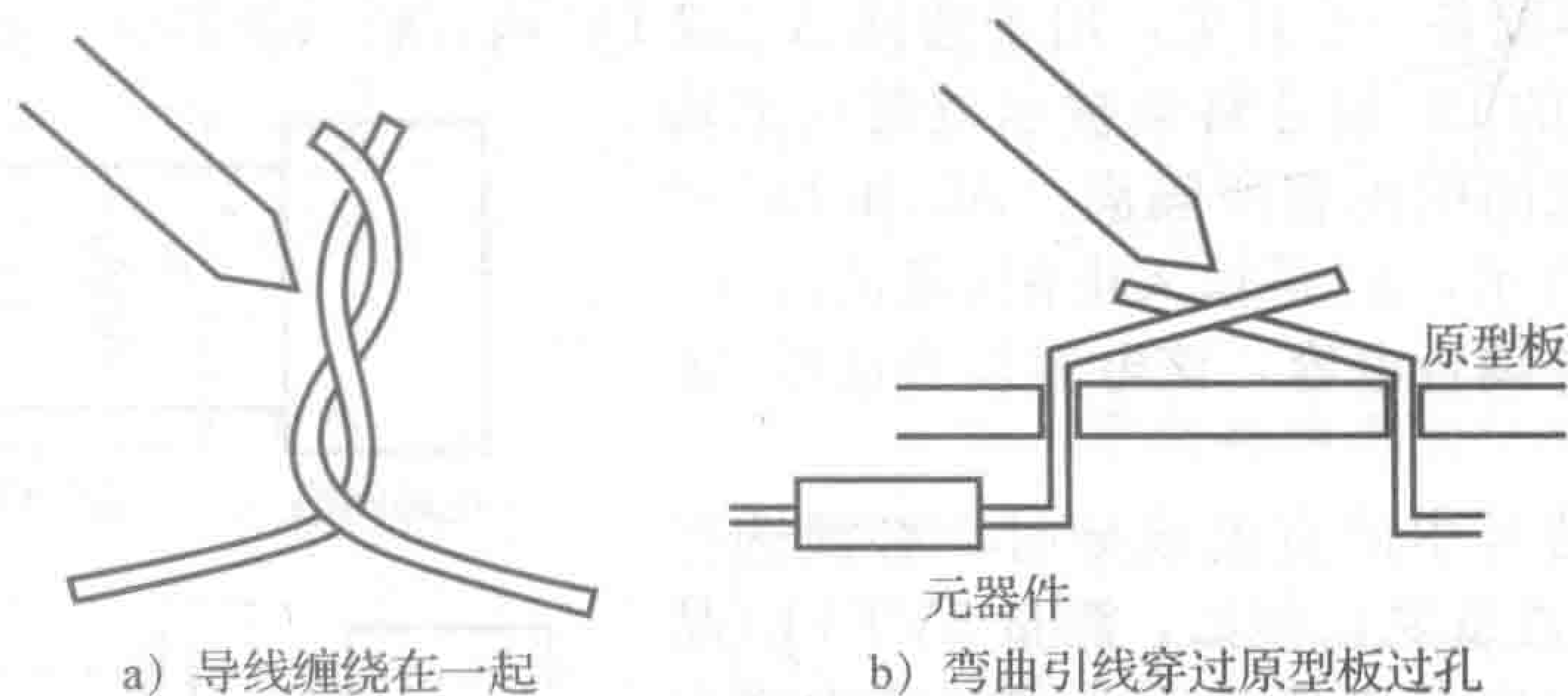
图2-41 烙铁

为了创建良好的焊接，应该遵循以下原则：

1. 焊接前，请确保已准备好所需的一切：热烙铁、焊料、元器件、导线、原型板或PCB，焊接头清洁垫和放大镜。

2. 清洁准备连接的表面，可以使用细砂纸、钢丝绒或金属刷来去除氧化层和污垢，以便焊料能够轻易地润湿表面。松香芯(焊剂)焊料将增强润湿过程。

3. 通过弯曲或扭曲将多根电线进行机械连接，并确保元器件已经固定好，防止在使用烙铁焊接时移动。图2-42所示为准备焊接的两根绞合在一起的导线和一个插入原型板中的元器件。



a) 导线缠绕在一起　b) 弯曲引线穿过原型板过孔

图2-42 准备焊接接点

4. 加热待焊接的导线和金属表面，使焊料适当地润湿金属以产生强的结合。当焊接电子元器件时，需要在加热过程中进行操作，以使得该过程足够快，避免损坏电子元器件。具有尖锐焊头的电烙铁可以在很小范围内传递热量，使其可以方便地焊接小型电子元器件。

5. 当表面暂时被加热时，将焊料放到工件上(而不是烙铁上)，这样焊料会流过需要焊接的表面。补充足够的焊料，以提供一个饱满但非球状的连接(如果焊接时出现焊锡球，则表明烙铁不够热)，轻轻地移去烙铁，焊接点瞬间凝固。当焊料凝固时，应该看到焊料的表面纹理会稍有变化。如果焊点不平整或粗糙，则可能是焊接温度不够，或焊料没有正确地润湿焊接表面。这种焊接点没有充分或可靠地连接，需要重新焊接修复。图2-43说明了一个元器件引脚穿过穿孔板成功焊接的实例，其中焊料润湿了两个表面。

6. 如果有助焊剂溶剂，请擦拭焊接点以保持清洁。

7. 可以用放大镜检查焊接工作，尽量让焊接点看起来美观。

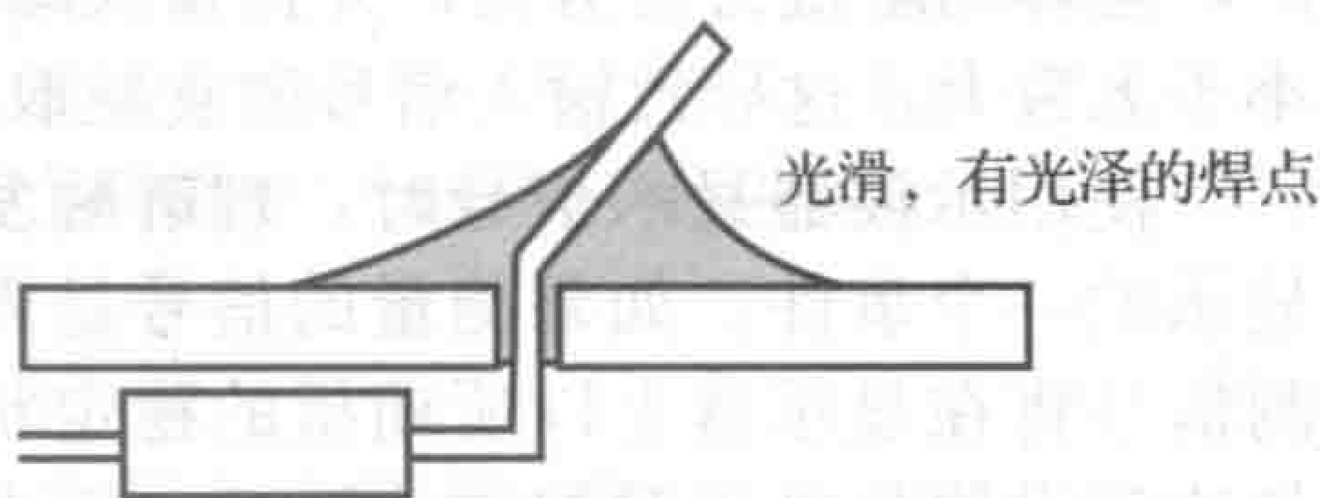


图2-43 成功的焊点

对于小的元器件或IC，为了避免过度过热，可以使用散热器。散热器是一种类似于鳄鱼夹的金属片，与元器件和连接点之间的导线相连，用于吸收传导到元器件上的一些热量。然而，如果散热器太接近焊接点，则难以加热导线。当使用IC时，可以首先将IC插座焊接到原型板中，然后再插入IC，从而避免IC上有任何热应力。

当在原型板上使用连接线时请使用实心(非编织)线，因为实心线更易于操作。在焊接之前，必须剥去导线的绝缘层。当在电路中使用连接线时，请使用镀锡线(用薄的焊料层覆盖导线的端部)以便于连接。

如果不正确地连接了元器件，则需要移除一个或多个焊点，这时可以使用吸锡器轻松地完成这个工作。首先将吸锡器(见图2-44)的活塞杆压下，然后用烙铁加热焊点，然后按下吸锡器按钮吸收熔化的焊料。因为此时只残留了很少的焊料，因此可以很容易地拆除元器件。

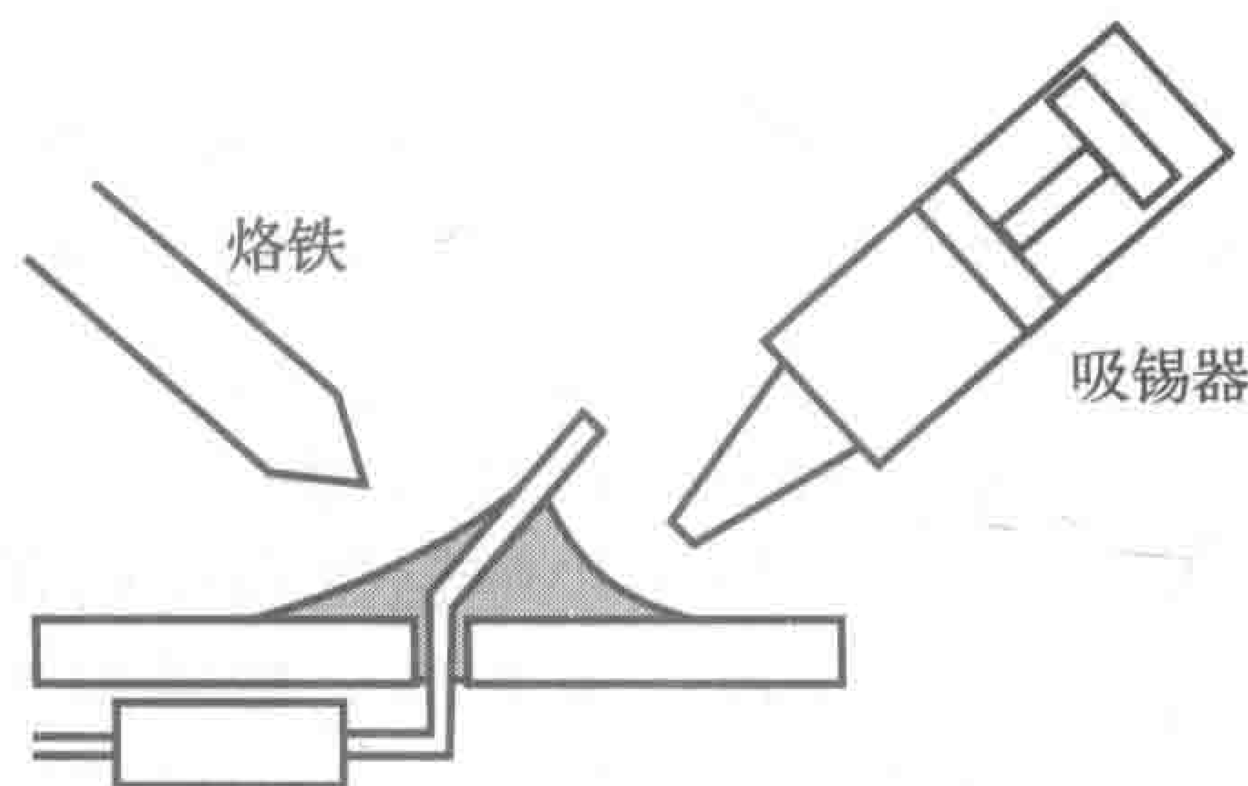


图2-44　拆除一个焊点

有关如何正确焊接的更多信息和建议，参见网络链接2.12和2.13，另外视频演示2.14也是一个很好的资源。

2.10.5　示波器

示波器可能是最广泛使用的电气仪器之一，并且是最易被误用的仪器之一。实验练习3提供了正确连接示波器输入、接地、耦合和触发示波器的方法。视频演示2.8提供了典型示波器的功能演示，本节提供有关示波器的一些基本信息。

大多数示波器配备一个开关，用于选择AC或DC耦合到示波器输入放大器上。当选择AC耦合时，信号的DC成分将会被示波器内部输入端子和放大器之间的电容所隔离。AC和DC耦合结构如图2-45所示，R_{in}是输入电阻(阻抗)，C_{in}是输入电容。C_c是耦合电容，该电容仅当选择AC耦合时才存在。

当需要隔离信号中的直流成分时，必须选择**AC耦合**，这点非常重要，例如，测量5VTTL(晶体管-晶体管逻辑)电源电压上很小的AC尖峰和瞬变。然而，使用AC耦合时必须记住以下几点：

- 无法确定是否存在相对于地的任何DC电平。
- 信号的低频分量会衰减。
- 当示波器从DC耦合切换到AC耦合时，需要一点时间才能使显示稳定，这是由于将耦合电容C_c充电到信号的DC分量值(平均值)需要一定的时间。
- 示波器说明中有时会给出输入时间常数($\tau=R_{in}C_c$)，该数值表示，大约5个时间常数(5τ)之后，显示的信号趋于稳定。

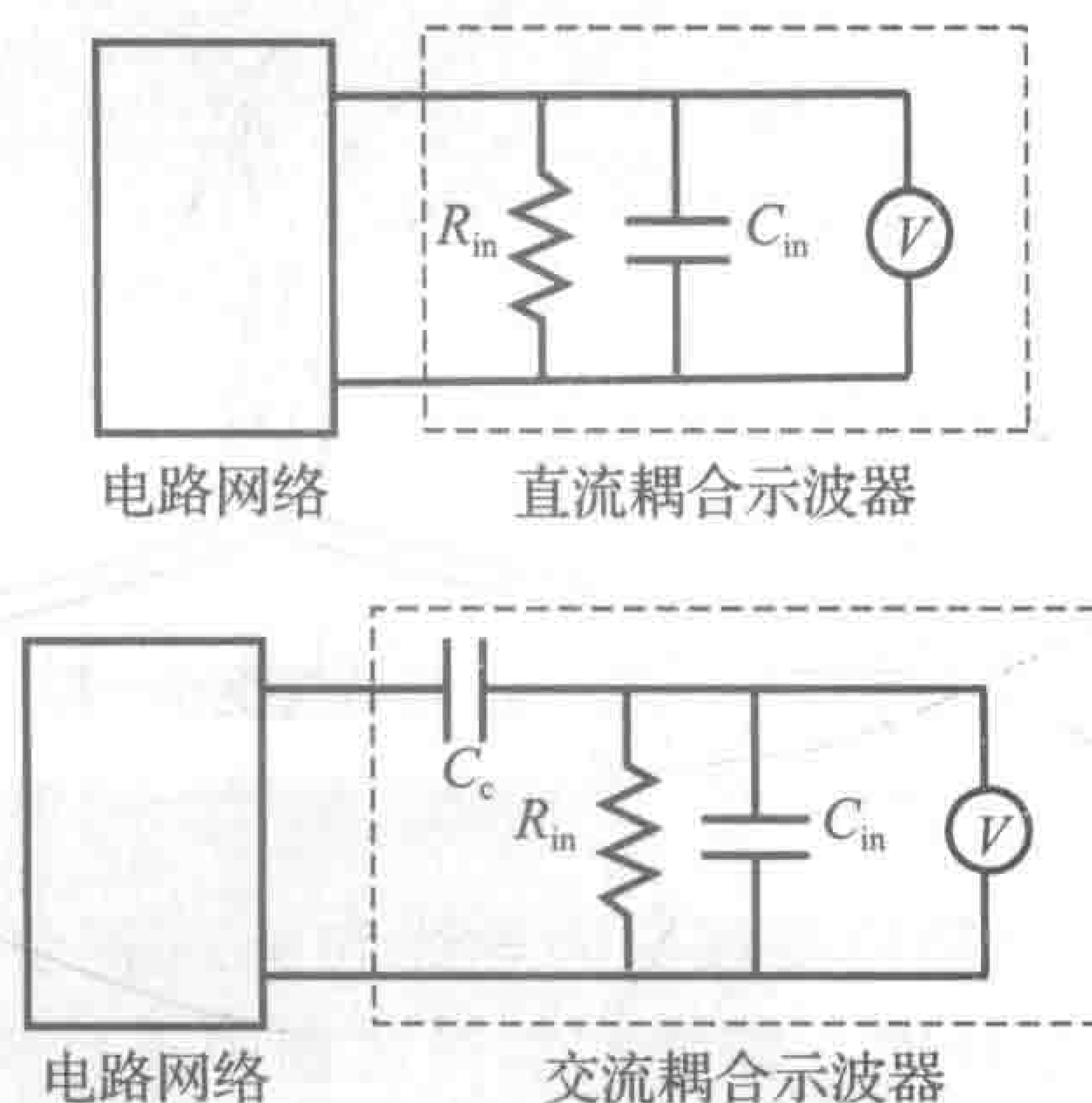


图2-45　示波器的耦合

AC耦合可以通过耦合电容的阻抗是频率的函数来解释：$Z_c=1/(j\omega C)$。对直流电压($\omega=0$)，电容的阻抗为无穷大，并且输入端的所有直流电压会被电容阻挡。对于AC信号，阻抗小于无穷大，这导致输入信号的衰减取决于频率。随着输入频率的增加，衰减减小到零。

使用示波器显示信号时，理解**触发**的概念很重要，触发是信号在示波器显示器上扫描显示的一个事件。如果测量的信号是周期性的，则当触发事件与每次扫描显示同步时，被测信号将在显示器上以所期望的稳定状态呈现出来。示波器可以是电平触发的，当被测信号达到设置的电平时扫描才开始；还有一种是斜率触发，只有当被测信号达到一定的信号变化率时扫描才开始。另一种比较有用的触发是电力线路触发，AC电源线路的输入用于

同步扫描，在此模式下，当任何端子电压与60Hz或60Hz倍频同步时就会起动触发，从而可以检测与各种线路相关的信号源中是否混叠了60Hz的噪声。

通常电路中的所有**测量仪器**、电源和信号源必须有一个**公共参考地**，如图2-46所示。但是为了测量**差分电压** ΔV，示波器的连接方式如图2-47所示，此时示波器信号地和外部电路网络并不共地，这样允许测量电路中任何位置的电位差。但是在一些示波器中，每个通道的"−"信号端要连接到机箱地，而机箱的地要连接到AC线路的接地端，因此，为了进行差分电压的测量，必须使用双通道信号差分功能，使用每个通道的"+"信号端进行测量。对DC电路来说，另一种测量差分电压的方法是，测量电路中每个节点对地的电压，然后将两个节点电压相减即可。

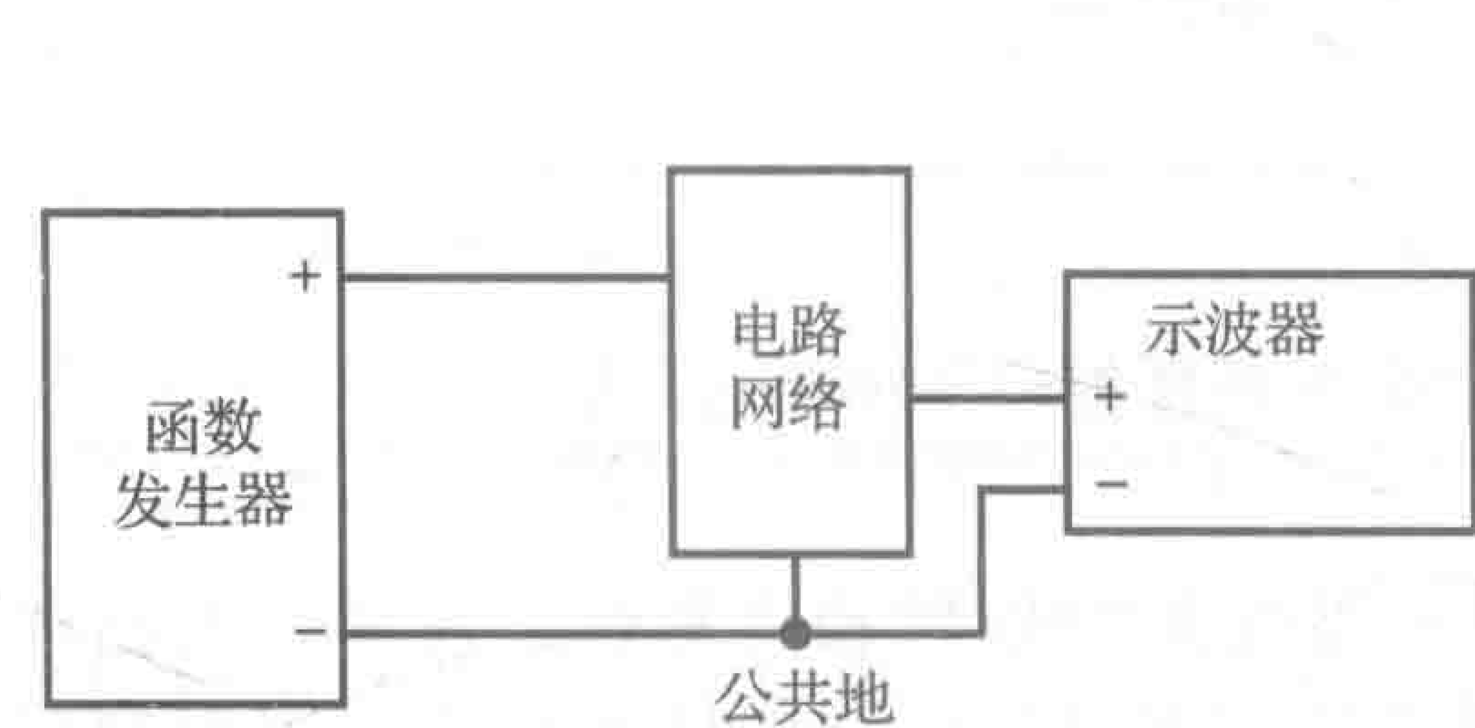


图2-46 公共地的连接

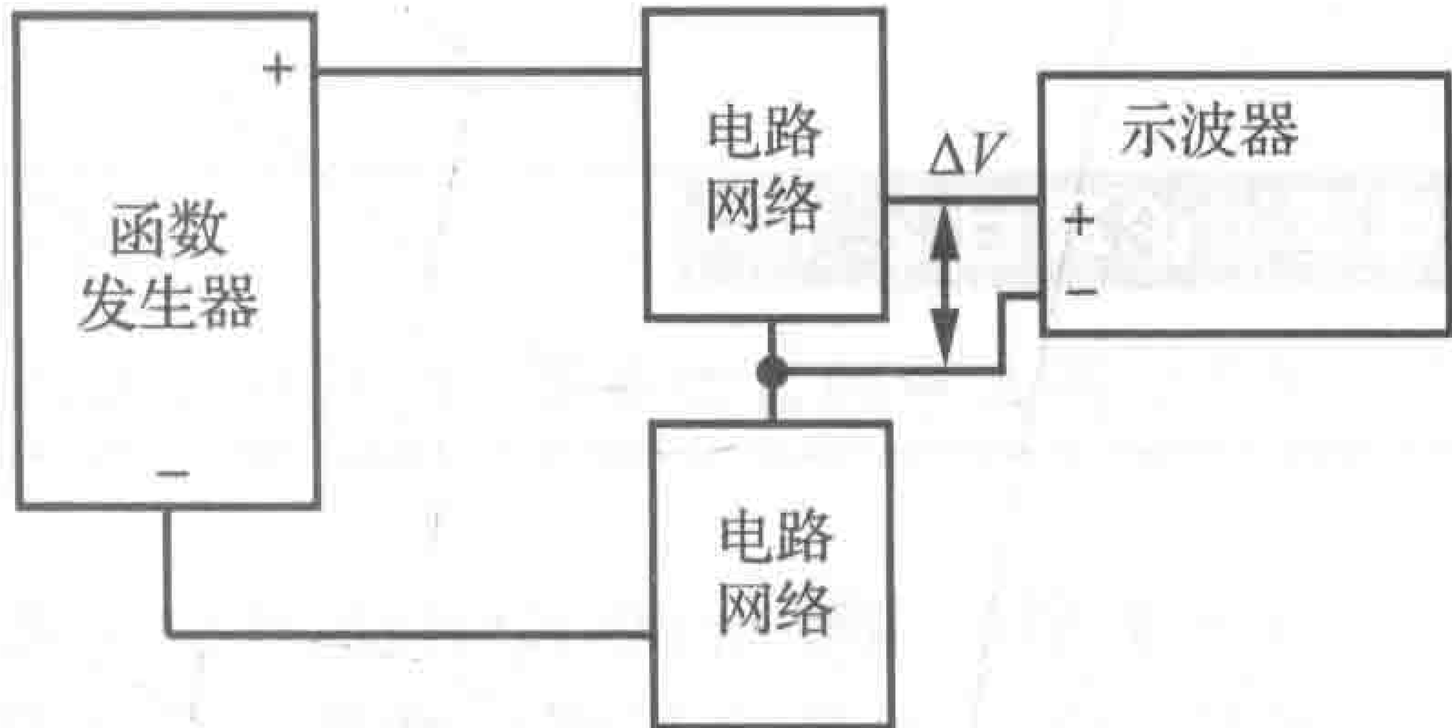


图2-47 相对地的连接

示波器的**输入阻抗**通常相当大，在1MΩ范围内。尽管如此，如2.4节所述，当测量元器件的阻抗与示波器的输入阻抗相似或更大时，当用示波器测量元器件上的压降时可能会存在严重的误差。避免这个问题的一种方法是使用衰减探头，这样可以增加示波器的输入阻抗，该探头会使输入阻抗增加一定倍数，同时所显示信号的幅值也会减小相同的倍数。因此，10倍型探头将使示波器的输入阻抗增加10倍，同时显示的电压幅值将仅为实际电压的1/10。大多数示波器会提供一个替代刻度，方便在使用10倍型探头时读数。

2.10.6 接地和电气干扰

在电路或系统中对于使用的所有仪器和电源提供一个公共地作为公共电压参考是很重要的。如图2-48所示，许多电源具有正DC输出(+输出)和负DC输出(−输出)。这些输出产生的正电压和负电压是以公共地为参考的，通常标记为COM。当将其他仪器和电路连接至电源时，所有输入和输出电压必须参考相同的公共地。在组装一组设备时，建议仔细检查每个信号接地连接的完整性。

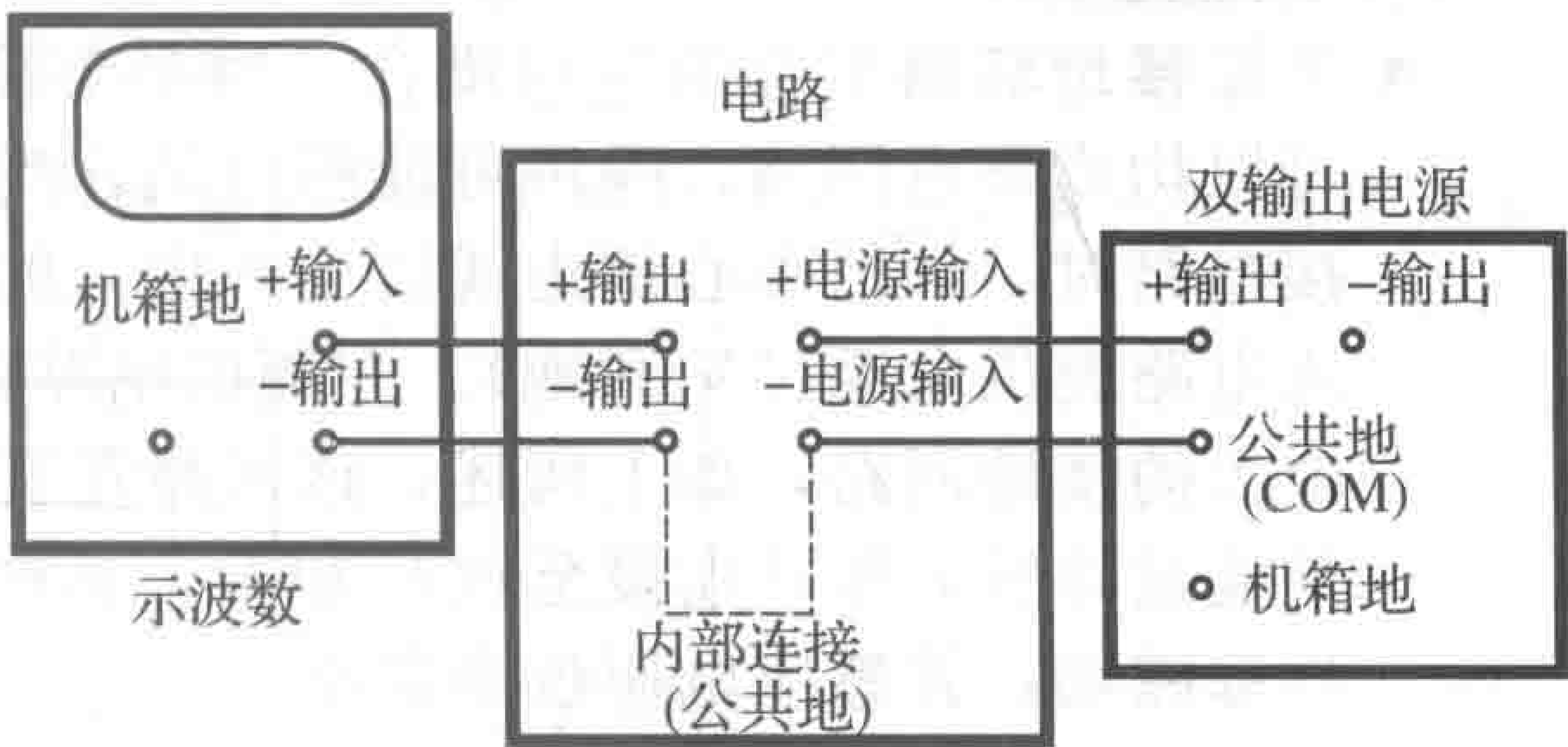


图2-48 公共地

同样很重要的是不要将信号地与机箱接地混淆。**机箱接地**在内部连接到电源线的接地线上，并且可能不连接到信号地(COM)上。机箱接地连接到包含仪器的金属外壳上，这样在仪器内部出现故障时可以确保用户安全(见2.10.7节)。

图2-49所示为电磁干扰问题的示意图，通过测量导线中的磁感应可能将高频电噪声混入到信号中。由引线包围的区域包含来自环境中的任何AC源所产生的外部磁场，例如，AC电力线或电动机，这将产生不期望的AC磁感应电压，其值可由法拉第定律给出：

$$V_{\text{noise}} = A\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{2-79}$$

其中，A 是由引线包围的面积；B 是外部磁场。测量电压与实际值不同：

$$V_{\text{measured}} = V_{\text{actual}} + V_{\text{noise}} \tag{2-80}$$

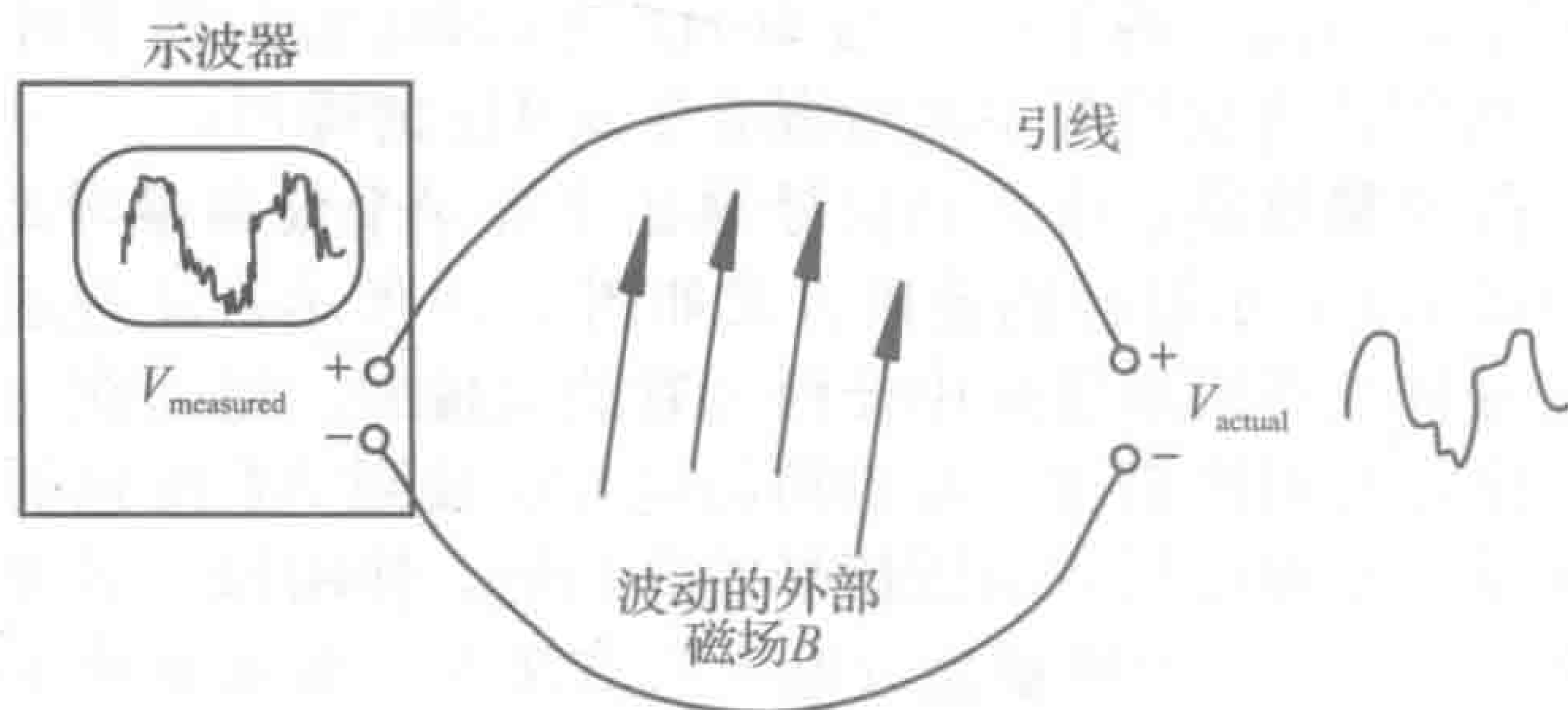


图 2-49 感应耦合

课堂讨论项目 2.10 **汽车电路**

通常，汽车中的诸如交流发电机或起动电动机的电气部件接地到车架上，解释这样做的原因。

许多类型的**电磁干扰**(EMI)可能会降低电路或系统的有效性和可靠性。此外，电路中设计不良的连接可能会导致出现噪声和不期望的信号，通过使用一些标准的方法可以减轻其影响。第一种方法是在可能的情况下消除或移走干扰源。干扰源可能是接近电路的开关、电动机或交流电源线，可能的方法是通过移除、重新布局、屏蔽或改善干扰源的接地。然而，这并不总是能够实现的，减小外部 EMI 或者内部耦合的一些标准方法有：

- 消除**多点接地**引起的电位差。公共接地总线(大导体、板或焊接平面)具有足够小的电阻，使得接地点之间的压降可忽略不计。此外，靠近多点连接，以确保每个接地点处于大致相同的电位。
- 使用**光隔离器**或变压器耦合将敏感信号电路与大功率电路隔离。光隔离器是一对 LED 光敏晶体管(在第 3 章中介绍)，它通过光而不是实际的导线来传输信号从而实现电路两端的解耦。它的优点之一是成功隔离了敏感的信号电路和大功率电路中的电流尖峰。
- 消除**接地环路**引起的电感耦合。当多个接地点之间的距离很大时，通过多个接地点可以构成导电回路，噪声可能感应耦合到这个电路中。图 2-50 说明了在面包板上连接电路时，如何小心地走线以免产生大的接地回路。图 2-50 所示的两个电路都向集成电路提供电源(5V 和地)。左侧的电路由导线 a 和 b 连接至点 A 和 B 导致形成一个大的接地回路，如上所述，该回路在有波动的磁场情况下会拾取感应电压。右侧是通过导线 c 和 d 连接至点 C 和 D，其产生的接地回路面积很小，因此，即使存在外部磁场，其感应电压也非常小。

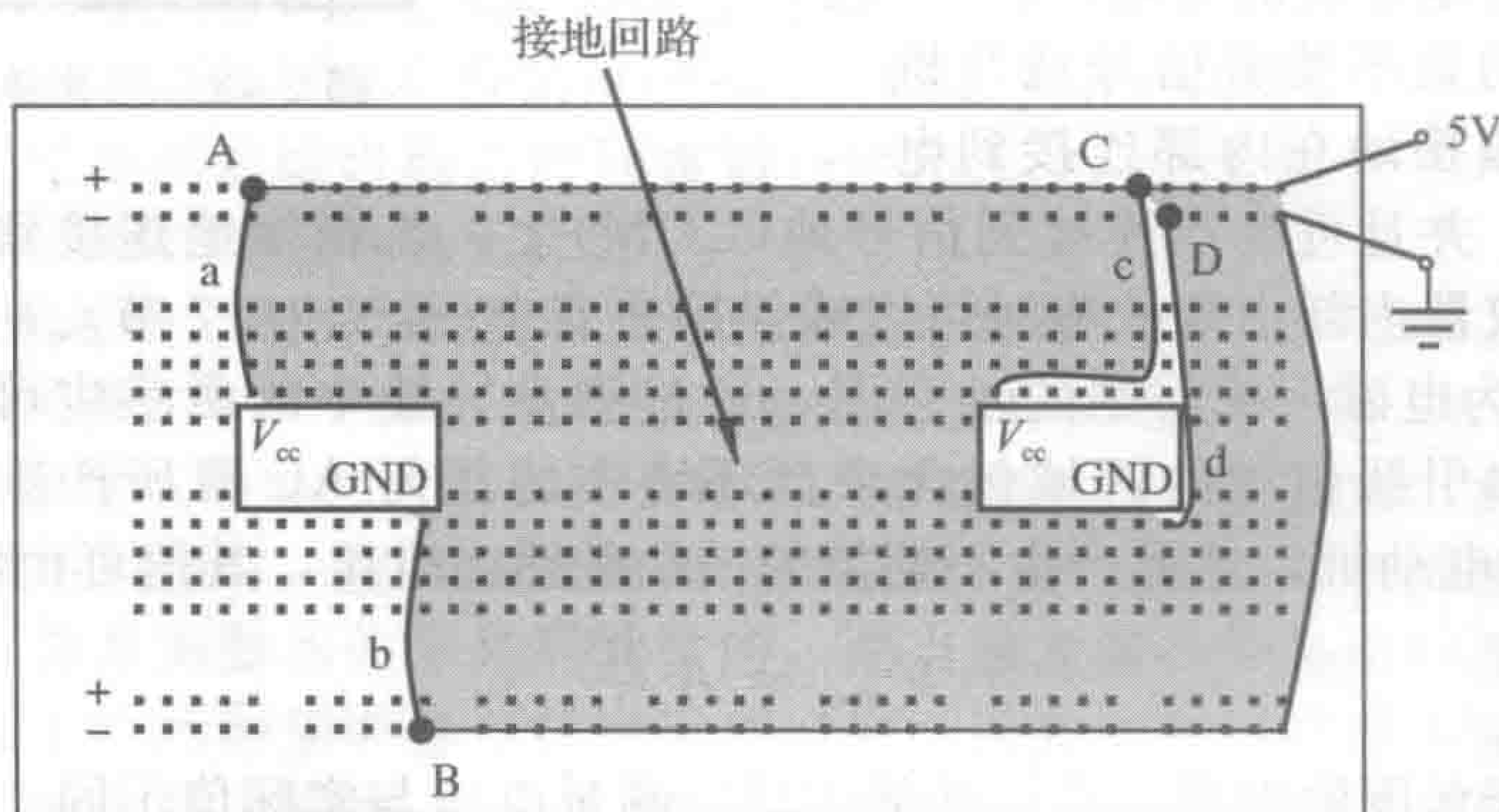


图 2-50 接地回路

- 使用接地金属罩屏蔽敏感电路，以阻挡外部电场和磁场。
- 在连接所有电路时使用短引线，以减少引线之间的电容和电感耦合。
- 在集成电路的电源和接地引脚之间使用**“去耦”**或**“旁路”电容**(例如，0.1μF)，为高频噪声提供短路。
- 对高频信号线使用同轴电缆或双绞线电缆，以尽量减少外部磁场的影响。
- 在存在功率电路(其大电流将产生大磁场)的情况下，信号线使用多芯屏蔽电缆代替带状电缆，这样可以有利于保持信号的完整性。
- 如果正在设计印制电路板，请确保提供足够的**地平面**。地平面是一个大的平面导体，可以最大限度地减少潜在的接地点之间的电位差。

更多的关于如何正确设计原型电路的信息和建议可以在 2.10.2 节中和 7.10.4 节中找到。

2.10.7 电气安全

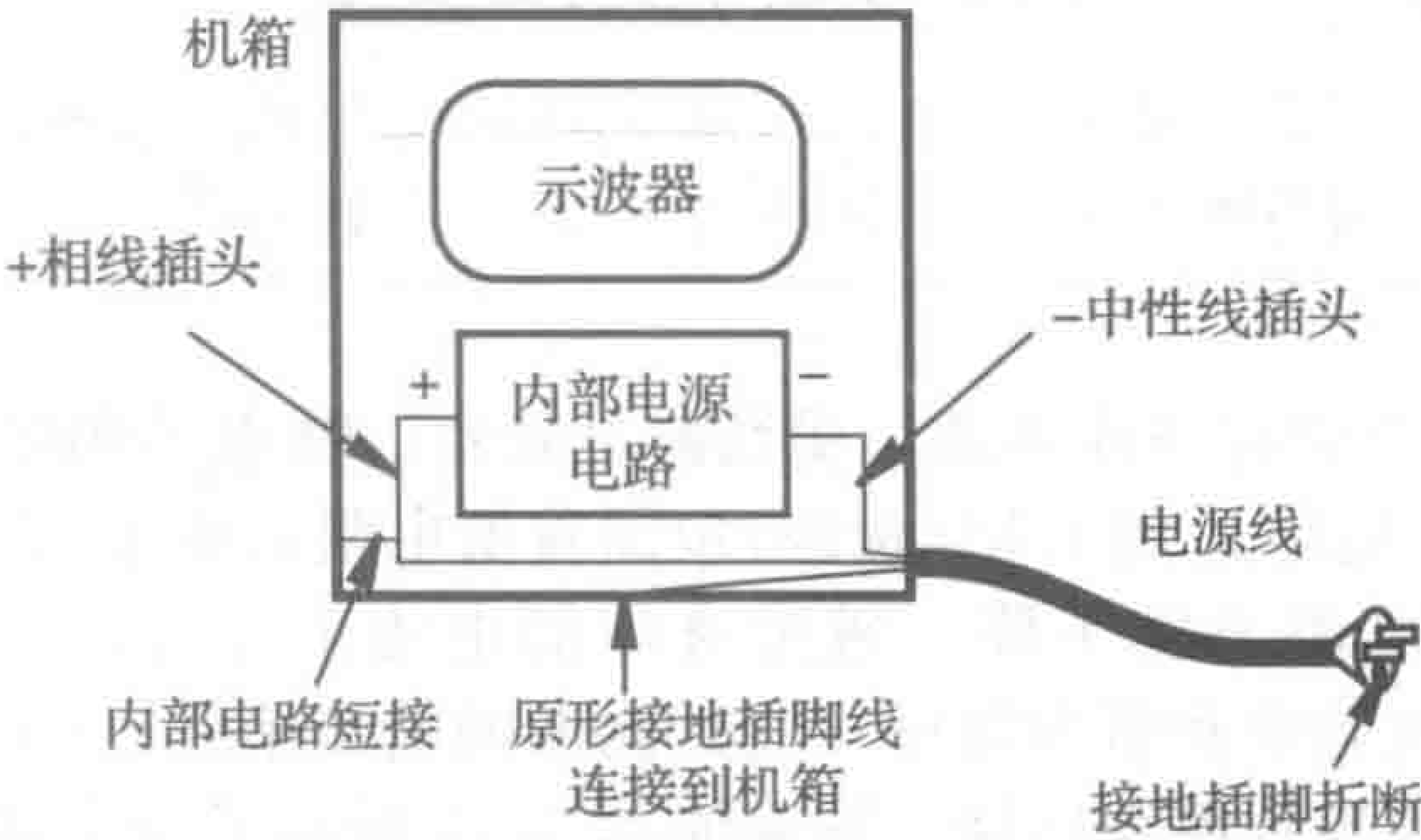
使用和设计电气系统时，应始终注意安全。在美国，电气规范要求插座带有 3 个端子：相线、中性线和地。图 2-51 所示为插座插头上的引脚。插头电缆中的电线包括连接到相线插脚的黑线，连接到中性线插脚的白线，以及连接到接地插脚的裸线或绿线。插头的两个扁平插脚(相线和中性线)是有源电路，用于将交流电从壁式电源插座上传输到电气装置。圆形接地插脚仅连接到设备机箱，不与设备的电源电路地互连。机箱地提供了一个到大地的替代路径，当设备电源电路出现故障时，减少了人员触摸机箱导致危险的可能性。当机箱地和电源地之间没有分开时，机箱上可能存在高压，此时人们在触摸机箱时将与地构成通路，这会给用户带来安全隐患。拆除接地插脚或使用三插头转二插头适配器时也会产生危险(参见课堂讨论项目 2.11 和 2.12)。



图 2-51　三插孔 AC 电源插头

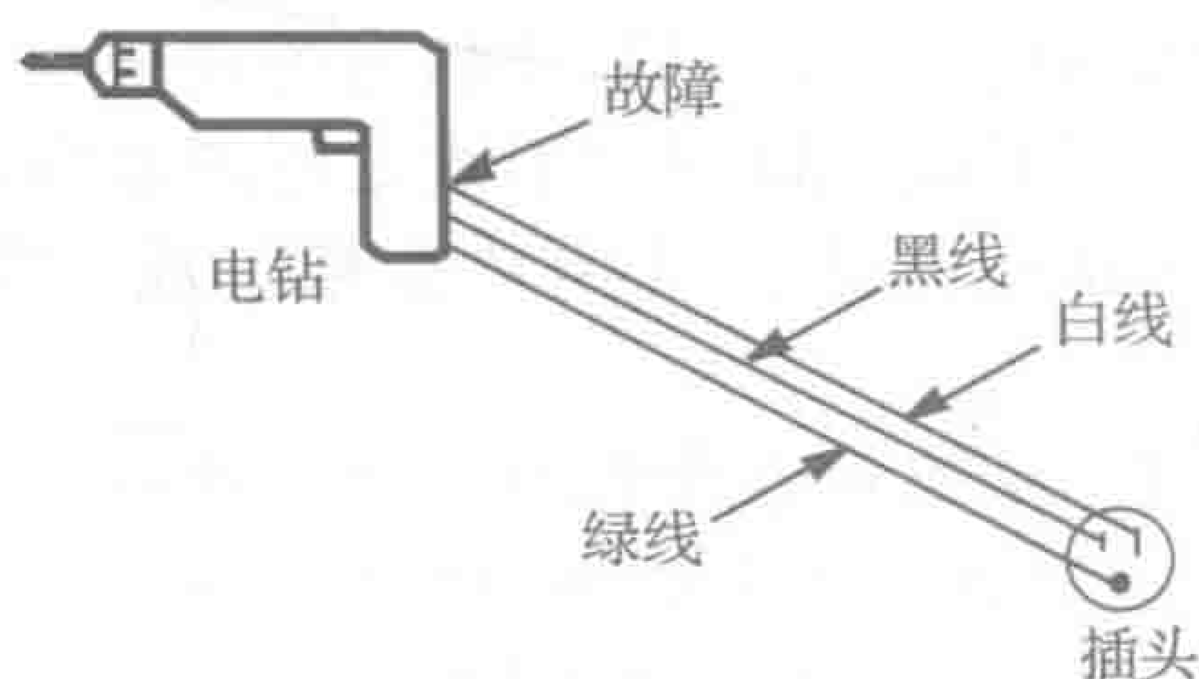
课堂讨论项目 2.11　**安全接地**

请考虑下面的示波器，其电源线的接地插脚被折断，使机箱未连接到地。如果使用此仪器，请描述可能面临的危险。



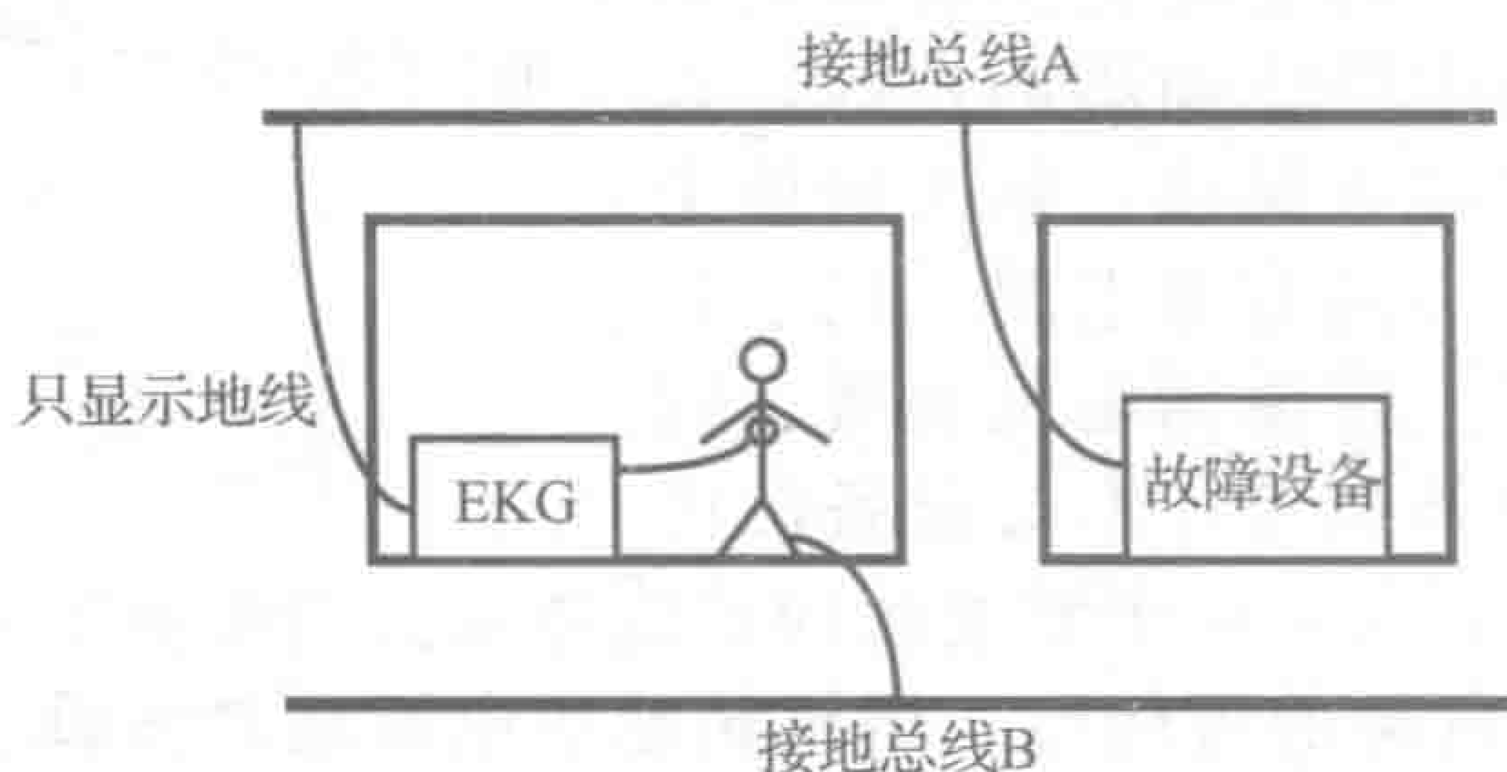
课堂讨论项目 2.12　**浴室中使用电钻**

下图所示的电钻由家用电源供电，并具有金属外壳。使用三插头转两插头适配器将钻头插入墙上插座。当站在一个湿浴缸里在墙上钻孔时，如果黑线的绝缘磨损使得其裸铜与钻头的金属外壳接触，此时将会导致何种致命的情形？如何防止或减轻它？



课堂讨论项目 2.13 危险的心电图

心脏病人躺在病床上，心电图(EKG)引线连接到他的胸部，以监测他的心律。在隔壁房间发生电短路，这个患者的心脏骤停。您和医院设备工程师已确定患者房间中有多个接地点(见图示)，并且隔壁房间的电气设备故障导致了电流从设备流入接地线。你在现场需要确定是否可能有致命的电流通过病人。注意地线在单位长度上具有有限的电阻，并且通过心脏的几微安电流都可以引起心室纤维性颤动(致命性过错)。



课堂讨论项目 2.14 高电压测量姿势

当进行高压测试时，有想法的电气技术人员声称只用你的右脚站立，并使用右手握住探头是进行测量的最安全的姿势。可能是什么逻辑支持这种说法？

课堂讨论项目 2.15 面临闪电风暴时的姿势

洛基山国家公园的公园管理员建议，如果雷雨期间你在开阔地区徒步旅行，并且你的头发是耸立的，此时你必须蹲下来，并保持双脚并拢。解释为什么这可能是救命的忠告。

当人体通过电流时会引起身体不适、受伤甚至死亡。从电的角度来说，人体大致由高电阻的皮肤(在干燥时皮肤电阻达到 10kΩ 量级)包围着低电阻的躯干(腹部大约为 500Ω 量级)组成。当皮肤湿润时，其电阻急剧下降。通过身体的电流低于 1mA 时通常感觉不到。不到 10mA 的电流就可能导致刺痛和肌肉收缩。通过胸部的电流不到 100mA 时就可能影响正常的心律。高于 5A 的电流可导致组织燃烧。视频演示 2.15 展示了一个电子玩具，说明了电流如何流过人体皮肤。在这种情况下，人的手形成一个电路用以控制闪烁的 LED。视频演示 2.16 和 2.17 图形化地说明了当动物和人类在高压线路周围不够小心时，可能会发生什么。

问题和练习

2.1 1km 长，规格为 14(直径为 0.064 08in)铜线的电阻是多少？

2.2　确定以下各电阻值的可能范围：

a. 电阻 R_1 的色环：红、棕、黄；

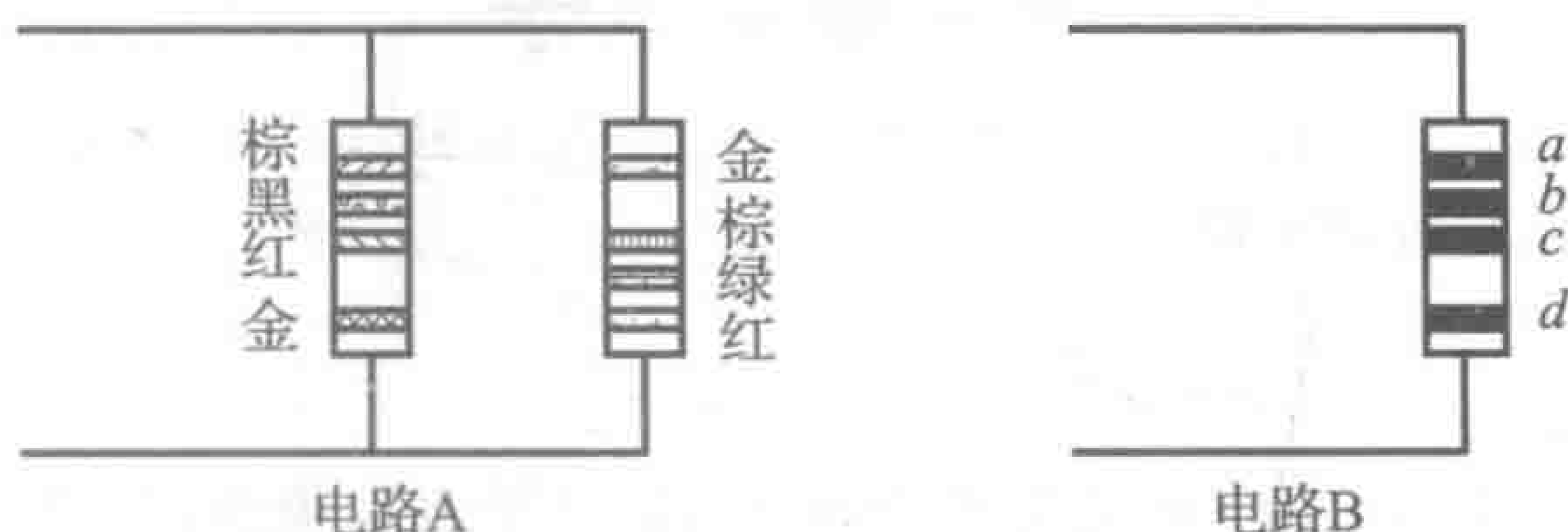
b. 电阻 R_2 的色环：黑、紫、橙；

c. R_1 和 R_2 的串联组合；

d. R_1 和 R_2 的并联组合。

注意：色环从第一个开始，并按顺序列出。

2.3　色环 a、b、c 和 d 分别是什么颜色才能使后面的电路 B 是电路 A 的等效电阻？



2.4　电路中使用微调电位器时，通常是与另一个固定值电阻串联的。分析为什么不采用并联方式？

2.5　对课堂讨论项目 2.1 进行完整的回答。

2.6　将基尔霍夫定律应用到电路时，它与你假定的电流方向有关系吗？为什么？

2.7　如果你急需 50Ω 的电阻，但是只有 100Ω 的电阻，你该如何做？

2.8　使用欧姆定律、KVL 和 KCL，推导 3 个并联电阻(R_1、R_2 和 R_3)的等效电阻表达式。

2.9　类似于式(2-38)，推导出 3 个并联电阻的分流公式。

2.10　给定两个电阻 R_1 和 R_2，其中 R_1 远大于 R_2，证明并联组合值近似等于 R_2。

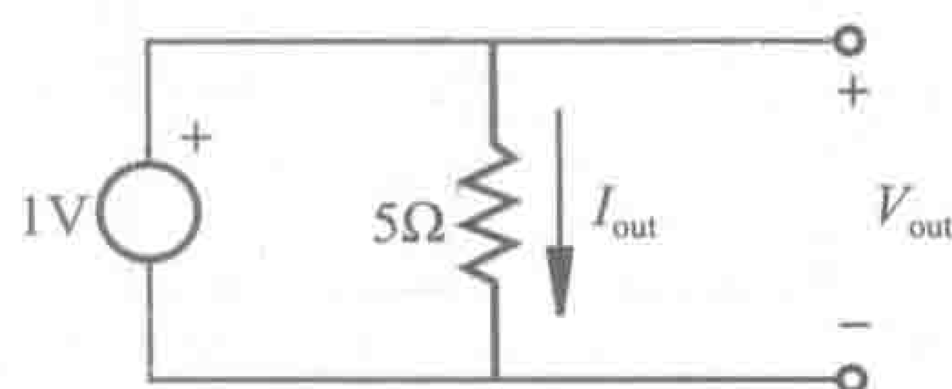
2.11　推导两个电容串联时的等效电容表达式。

2.12　推导两个电容并联时的等效电容表达式。

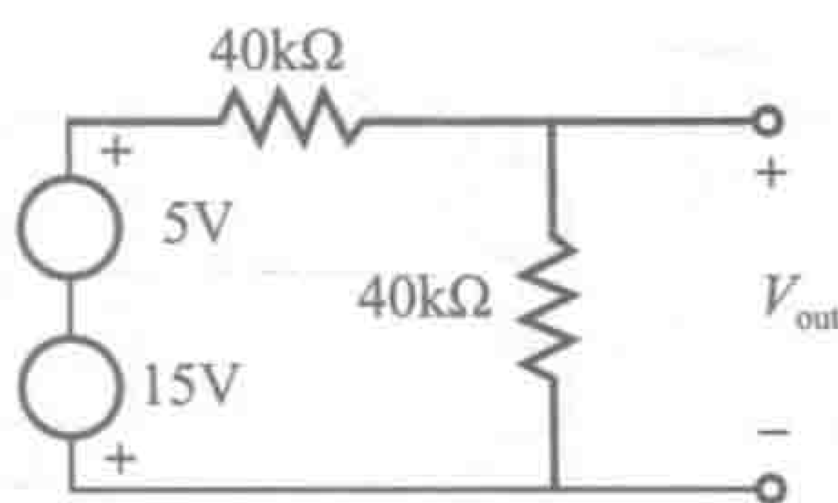
2.13　推导两个电感串联时的等效电感表达式。

2.14　推导两个电感并联时的等效电感表达式。

2.15　计算下图电路中的 I_{out} 和 V_{out}。



2.16　计算下图电路中的 V_{out}。



2.17　对于问题 2.27 中的电路，其参数为 $R_1=1\text{k}\Omega$、$R_2=2\text{k}\Omega$、$R_3=3\text{k}\Omega$ 和 $V_{in}=5\text{V}$，计算：

a. 流过 R_1 的电流；

b. 流过 R_3 的电流；

c. R_2 两端的电压。

2.18　对于例 2.4 中的电路，计算：

a. 流过 R_4 的电流；

b. R_5 两端的电压；

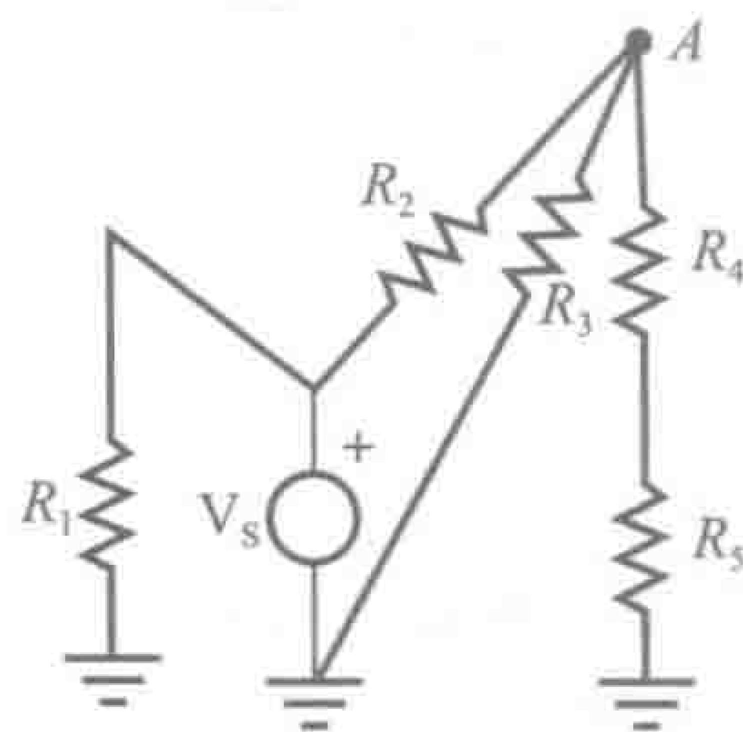
您可以使用示例中的结果来计算。

2.19　下图所示的电路中 $R_1=1\text{k}\Omega$、$R_2=2\text{k}\Omega$、$R_3=3\text{k}\Omega$、$R_4=4\text{k}\Omega$、$R_5=1\text{k}\Omega$ 和 $V_s=10\text{V}$，计算：

a. 由 V_s 端看进去的总等效电阻；

b. 节点 A 的电压；

c. 流过 R_5 的电流。



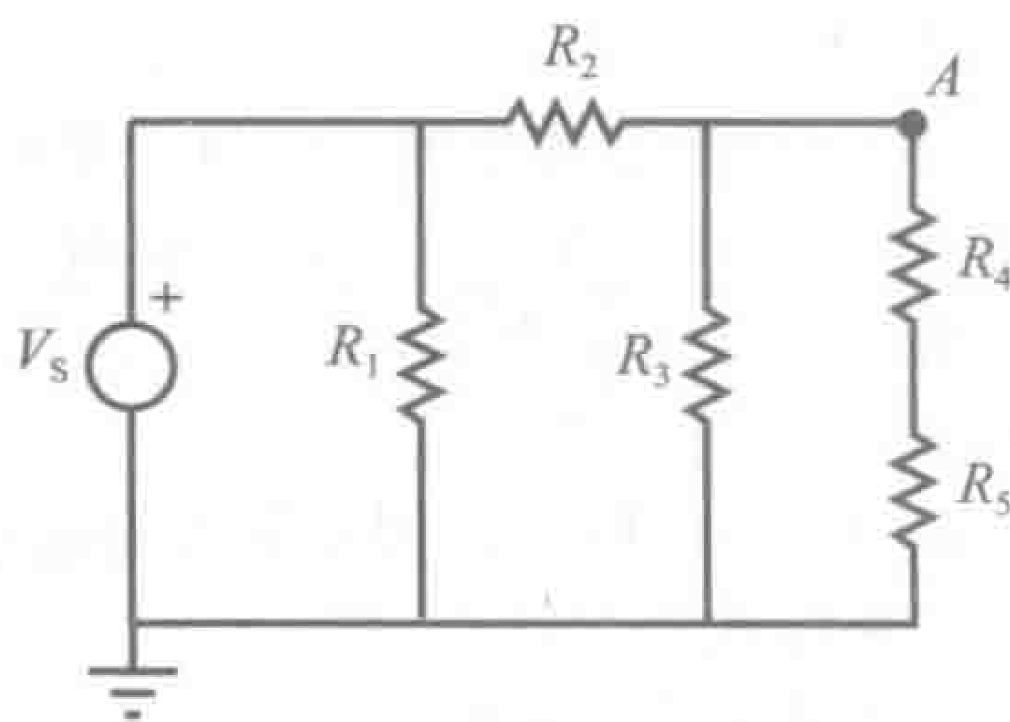
2.20 下图所示的电路中 $R_1=2\text{k}\Omega$、$R_2=4\text{k}\Omega$、$R_3=5\text{k}\Omega$、$R_4=3\text{k}\Omega$、$R_5=1\text{k}\Omega$ 和 $V_s=10\text{V}$，计算：

a. 由 V_s 端看进去的总等效电阻；

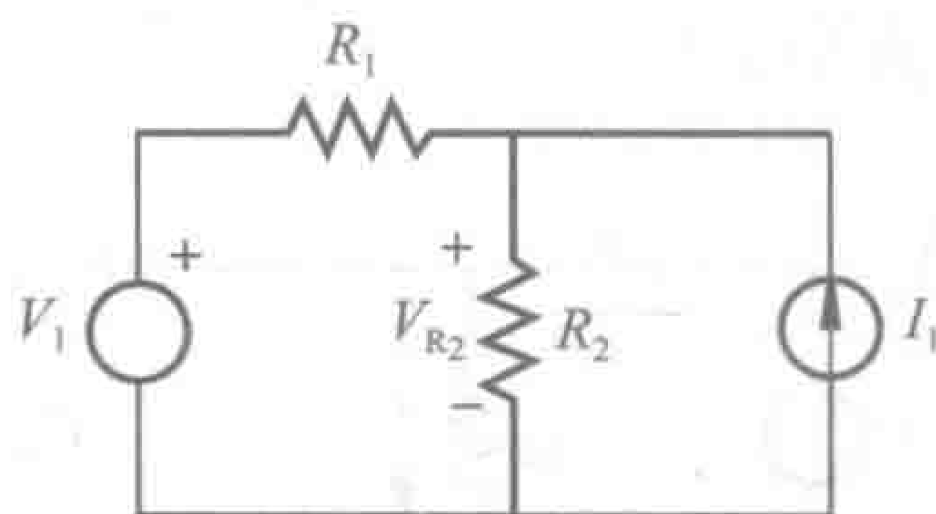
b. 节点 A 的电压；

c. 流过 R_5 的电流。

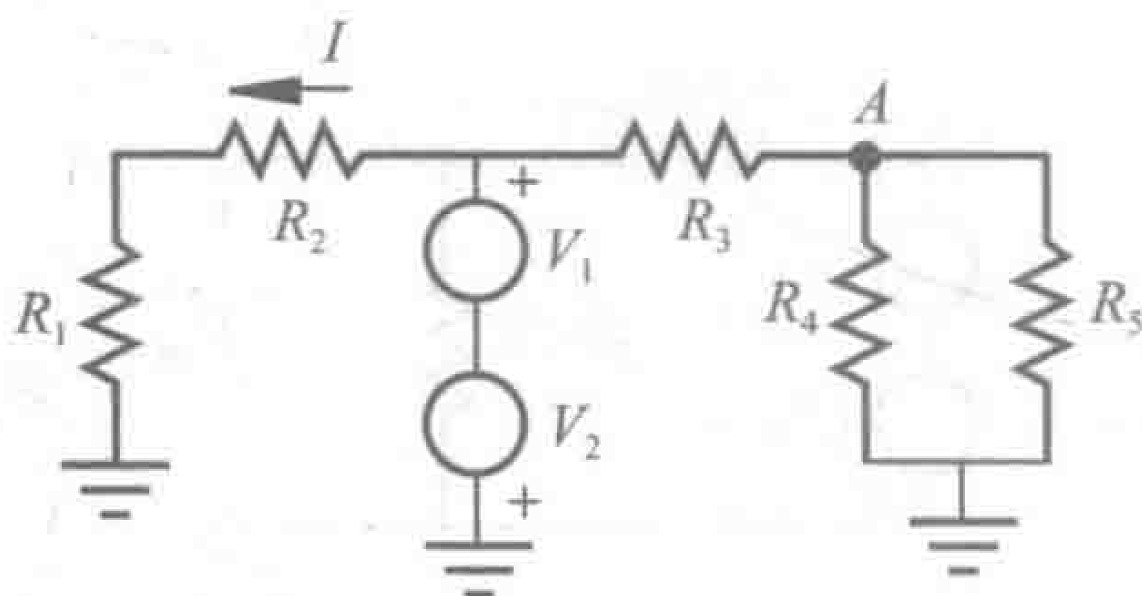
此外，这个电路与问题 2.19 中的电路有什么不同？如果电阻值相同，电路是否相同？如果不同，什么部分不同？



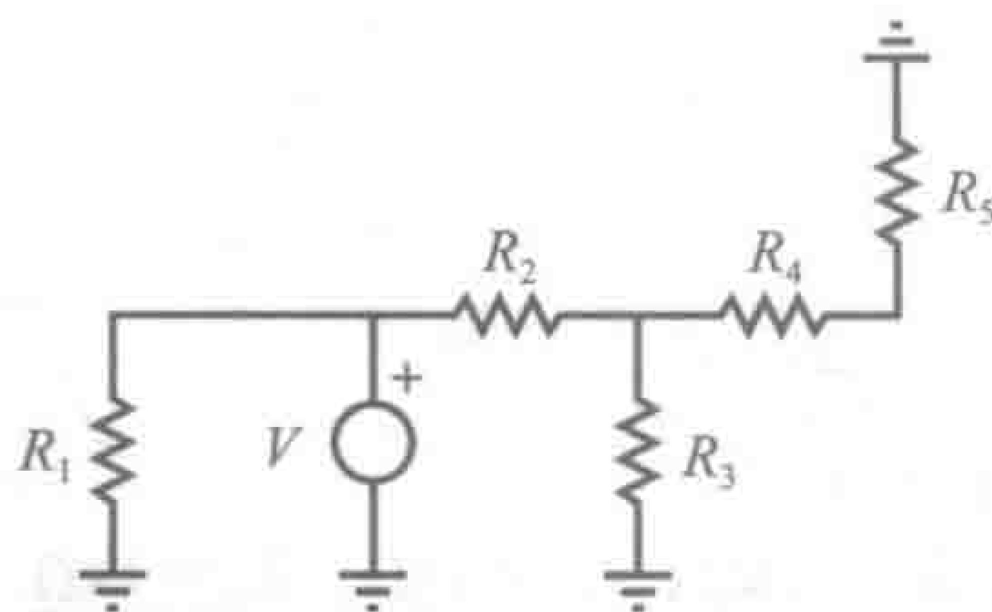
2.21 下图所示的电路中 $V_1=1\text{V}$、$I_1=1\text{A}$、$R_1=10\Omega$、$R_2=100\Omega$、V_{R_2} 是多少？



2.22 下图所示的电路中 $R_1=1\text{k}\Omega$、$R_2=9\text{k}\Omega$、$R_3=10\text{k}\Omega$、$R_4=1\text{k}\Omega$、$R_5=1\text{k}\Omega$、$V_1=5\text{V}$ 和 $V_2=10\text{V}$，计算电流 I 和节点 A 处的电压。



2.23 由电源 V 端看进去，计算下图所示电路的总等效电阻。电路中的电阻值分别为：$R_1=1\text{k}\Omega$、$R_2=2\text{k}\Omega$、$R_3=3\text{k}\Omega$、$R_4=4\text{k}\Omega$ 和 $R_5=5\text{k}\Omega$。



2.24 通过列写和求解例 2.4 中所有环路和节点的 KVL 和 KCL 方程，求出 I_{out} 和 V_{out}。

2.25 实验室直流电源的输出阻抗是多少？当直流耦合时，实验室示波器的输入阻抗是多少？

2.26 解释为什么使用示波器测量 $1\text{M}\Omega$ 数量级阻抗上的电压可能会导致显著的误差。通过分析证明你的

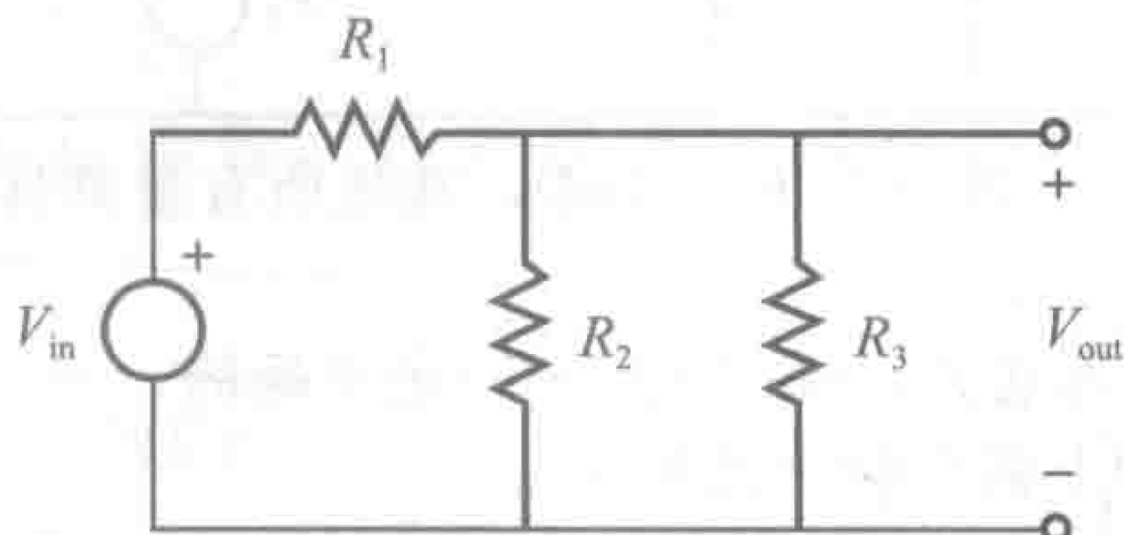
结论。

2.27　对于下图所示的电路，确定 V_{out} 与 V_{in} 的关系：

a. $R_1=50\Omega$、$R_2=10k\Omega$、$R_3=1.0M\Omega$

b. $R_1=50\Omega$、$R_2=500k\Omega$、$R_3=1.0M\Omega$

如果 R_3 表示的是一个设备的输入阻抗，它测量 R_2 两端的电压，那么对这两个电压测量结果你有什么结论？



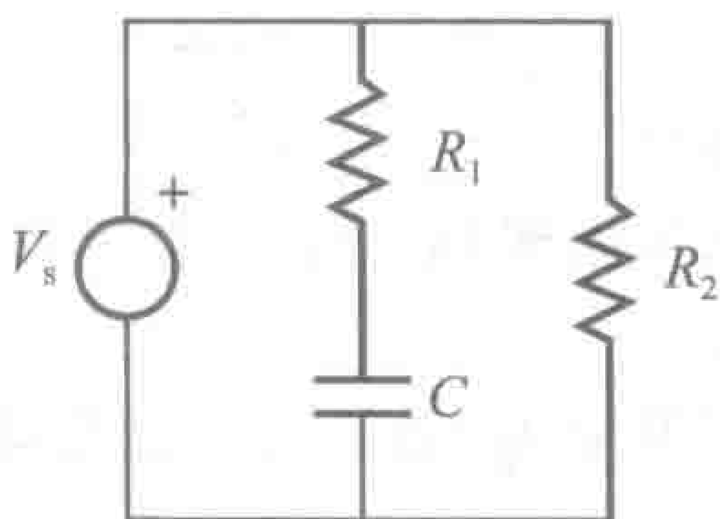
2.28　对于问题 2.27 中的电路，如果 R_1 表示电压源的输出阻抗，R_3 假定为无穷大(表示理想的电压表)，那么 R_1 对电压测量有什么影响？另外，问题 2.27a 和 b 中不同 R_2 值的效果有何影响？请对结果进行说明。

2.29　实验室直流电源的戴维南等效电路是什么？

2.30　对于问题 2.27a 中给出的电阻值，其戴维南等效电路是什么？

2.31　对于例 2.7 中的电路，计算作为时间函数的电容两端的稳态电压。您可以使用示例中的结果来帮助计算。

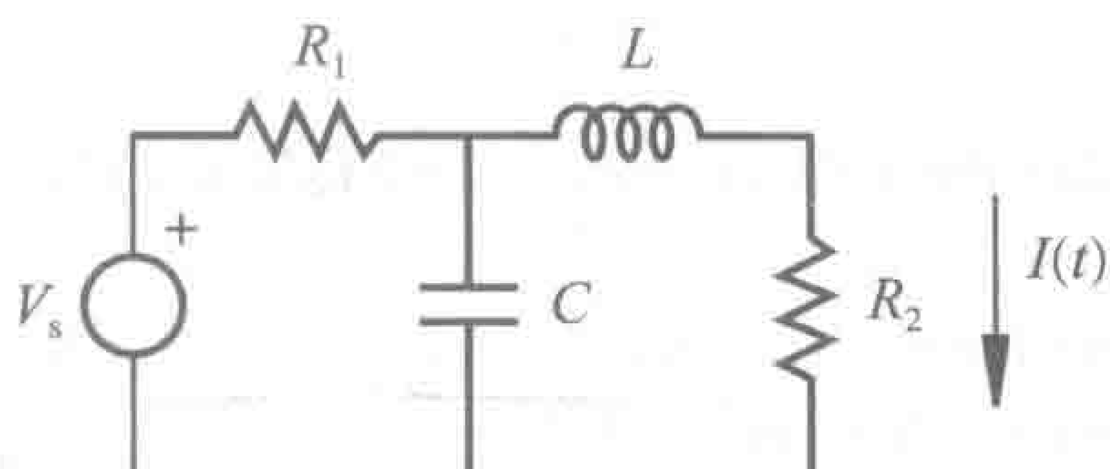
2.32　对于下图所示的电路，如果 $V_s=10VDC$、$R_1=1k\Omega$、$R_2=1k\Omega$ 和 $C=0.01\mu F$，计算 R_1、R_2 和 C 两端的稳态电压各是多少？



2.33　计算下图所示电路的稳态电流 $I(t)$，其中 $R_1=R_2=100k\Omega$，$C=1\mu F$ 和 $L=20H$，电源分别是：

a. $V_s=5VDC$

b. $V_s=5\cos(\pi t)V$



2.34　对于下列的每一个波形，分别指出以 Hz 和 rad/s 为单位时的频率、峰峰值和直流偏移是多少？

a. $2.0\sin(\pi t)$

b. $10.0+\cos(2\pi t)$

c. $3.0\sin(2\pi t+\pi)$

d. $\sin(\pi)+\cos(\pi)$

2.35　如果有效值为 100V 的电压施加在 100Ω 的功率电阻上，则功耗是多少？

2.36　如果 100V 的峰峰值电压施加在 100Ω 的功率电阻上，则功耗是多少？

2.37　如果标准美国家用电压有效值为 120V，则在示波器上观察到的峰值电压是多少？

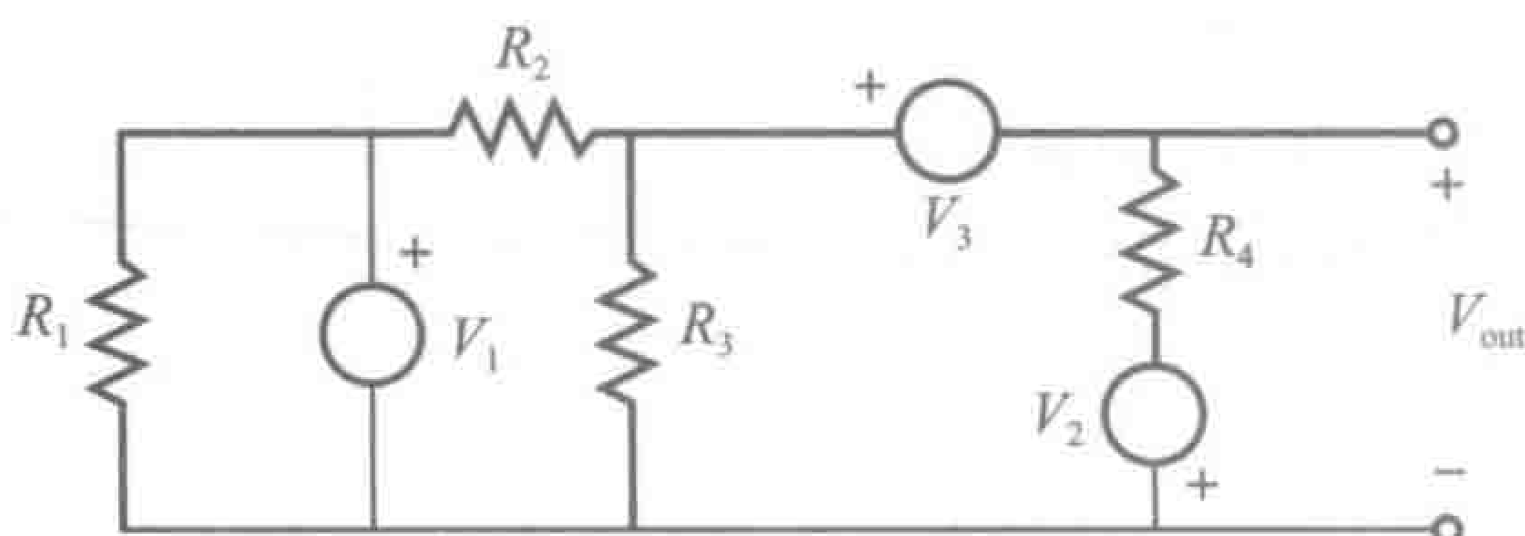
2.38　写出表示典型家用电压信号的函数。

2.39　电路设计者需要选择具有合适阻值的电阻与发光二极管(LED)相串联。LED 制造商声称，LED 需要 2V 的电压来保证其导通，10mA 的电流才能产生明亮的光。此外，电流不应超过 100mA。假设使用 5V 电源来驱动 LED 电路，则所选电阻的阻值范围是多大？此外，电阻的额定功率需要多大？

2.40　对于下图所示的电路，$R_1=1k\Omega$、$R_2=2k\Omega$、$R_3=3k\Omega$、$R_4=4k\Omega$、$V_1=10V$、$V_2=5V$ 和 $V_3=10V$，计算：

a. V_{out}；

b. 每个电压源产生的功率

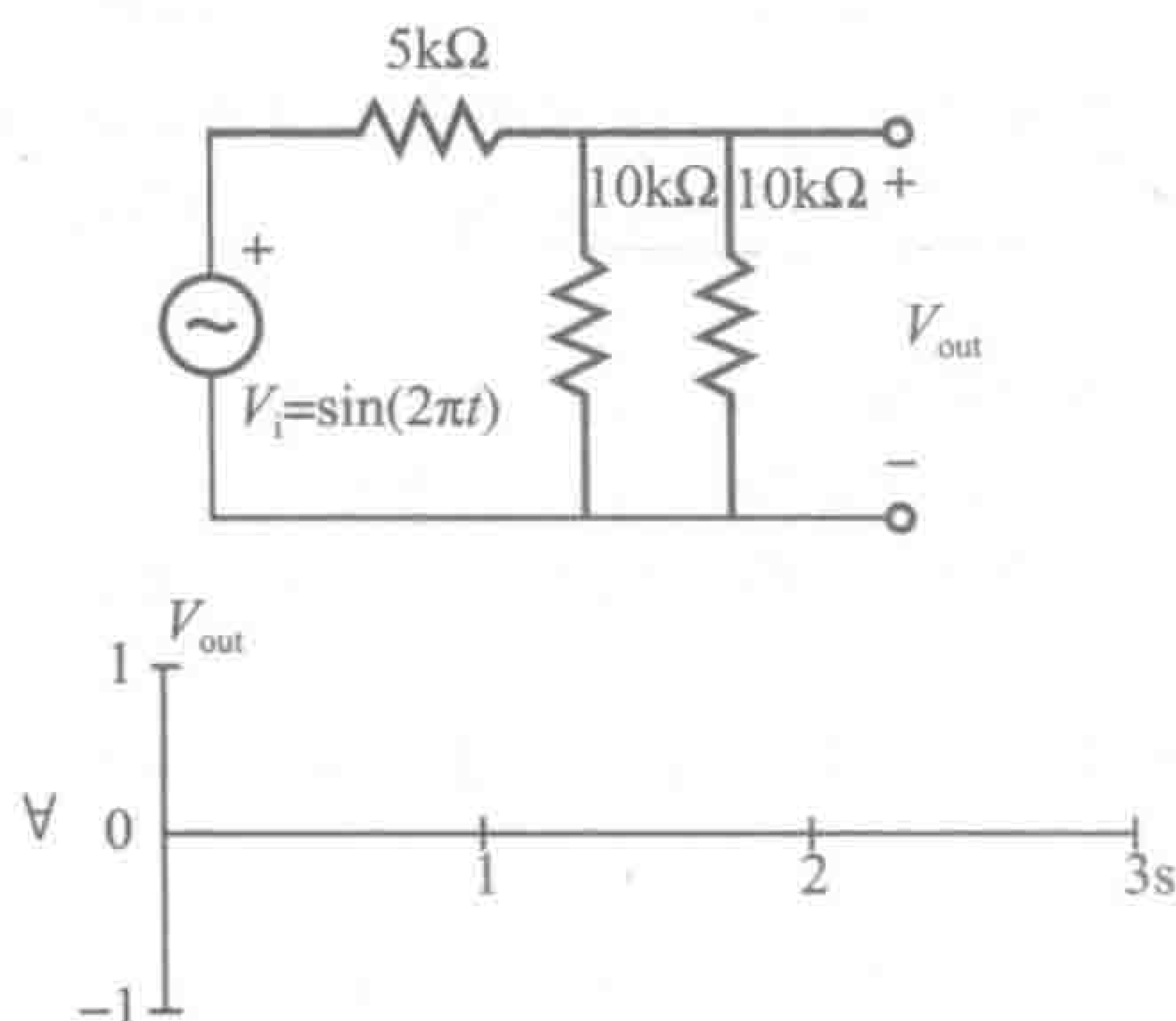


2.41　还是求解上述问题，其中 $R_3=2\text{k}\Omega$ 和 $R_4=1\text{k}\Omega$，其他所有量都保存不变。

2.42　证明式(2-66)。

2.43　推导式(2-67)所示的有效值表达式，说明式(2-68)是正确的。

2.44　电路如下图所示，在坐标轴上画出输出波形 V_{out}。



2.45　对课堂讨论项目 2.6 进行完整的回答。

2.46　如果你在为新厨房设计一个用于低压照明的 $24V_{rms}$ 变压器，为了满足电压源的设计要求，一次绕组和二次绕组的匝数比应该是多少？

2.47　如果您的音频立体声放大器的输出阻抗为 8Ω，为了最大化产生声音的功率，您的扬声器线圈应该具有多大的电阻？

2.48　当用示波器进行高频电压测量时，探针为什么是用 BNC(同轴)电缆而不是用两根独立的导线？

参考文献

Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics,* 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

Johnson, D., Hilburn, J., and Johnson, J., *Basic Electric Circuit Analysis,* 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

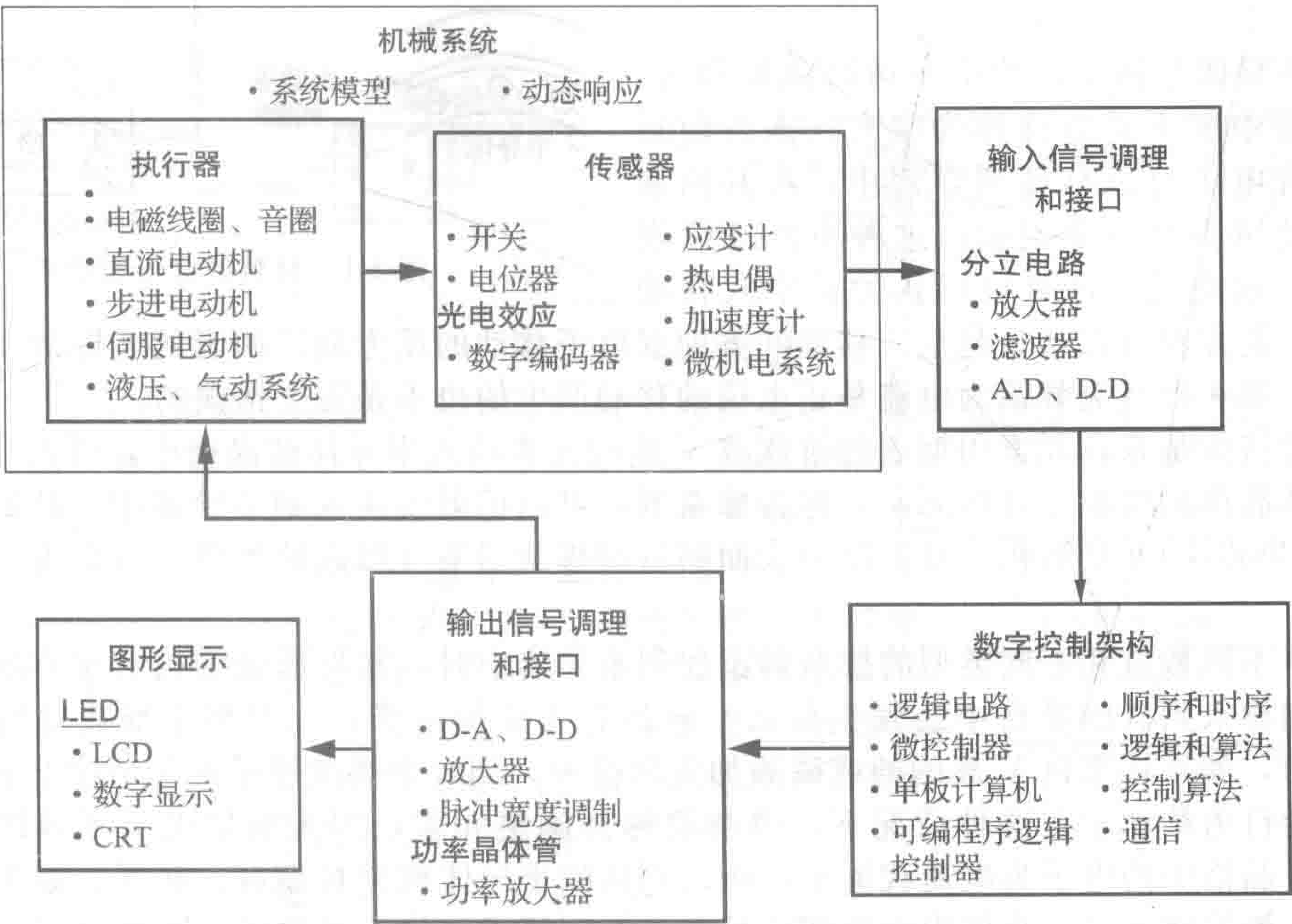
Lerner, R. and Trigg, G., *Encyclopedia of Physics,* VCH Publishers, New York, 1991.

McWhorter, G. and Evans, A., *Basic Electronics,* Master Publishing, Richardson, TX, 1994.

Mims, F., *Getting Started in Electronics,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5003A, 1991.

第3章 半导体电子器件

本章介绍半导体二极管和晶体管，这对机电一体化系统中的传感、接口和显示都很重要。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 理解半导体器件的基本物理原理；
2. 了解不同类型的二极管及其使用方法；
3. 了解双极型晶体管和场效应晶体管之间的相似点和区别；
4. 了解晶体管如何开关负载；
5. 能够使用二极管、稳压器、双极型晶体管和场效应晶体管设计电路；
6. 能够为设计选择半导体器件。

3.1 引言

本章研究一些特殊的材料，科学家和工程师已经将这些材料转化为影响 21 世纪及以后生活的各种发明。为了理解这些发明，需要了解称为半导体的这一类材料的物理特性，这些材料在当今的电子电路中应用广泛。本章研究半导体的物理学，讨论如何用不同类型的半导体材料设计电子器件，学习不同半导体二极管和晶体管的电路原理图符号，并在电路设计中使用这些器件。

3.2 半导体物理是理解电子器件的基础

金属在所谓的导带中具有大量弱约束的电子。当对金属施加电场时，电子自由移动，

产生通过金属的电流。由于大电流可以很容易地在金属中流动，因此它们称为**导体**。相反，其他材料的原子具有紧密束缚的价电子，当施加电场时，电子不容易移动，这些材料称为**绝缘体**，并且通常不能承受大电流。此外，非常有用的一类材料(即元素周期表中的第Ⅳ族元素)具有介于导体和绝缘体之间某些特性，称为**半导体**。如硅和锗等半导体具有的载流特性取决于温度或照射的光量。如图 3-1 所示，当在半导体上施加电压时，一些价电子很容易跳到导带上，然后在电场中移动产生电流，尽管其电流小于在导体中产生的电流。

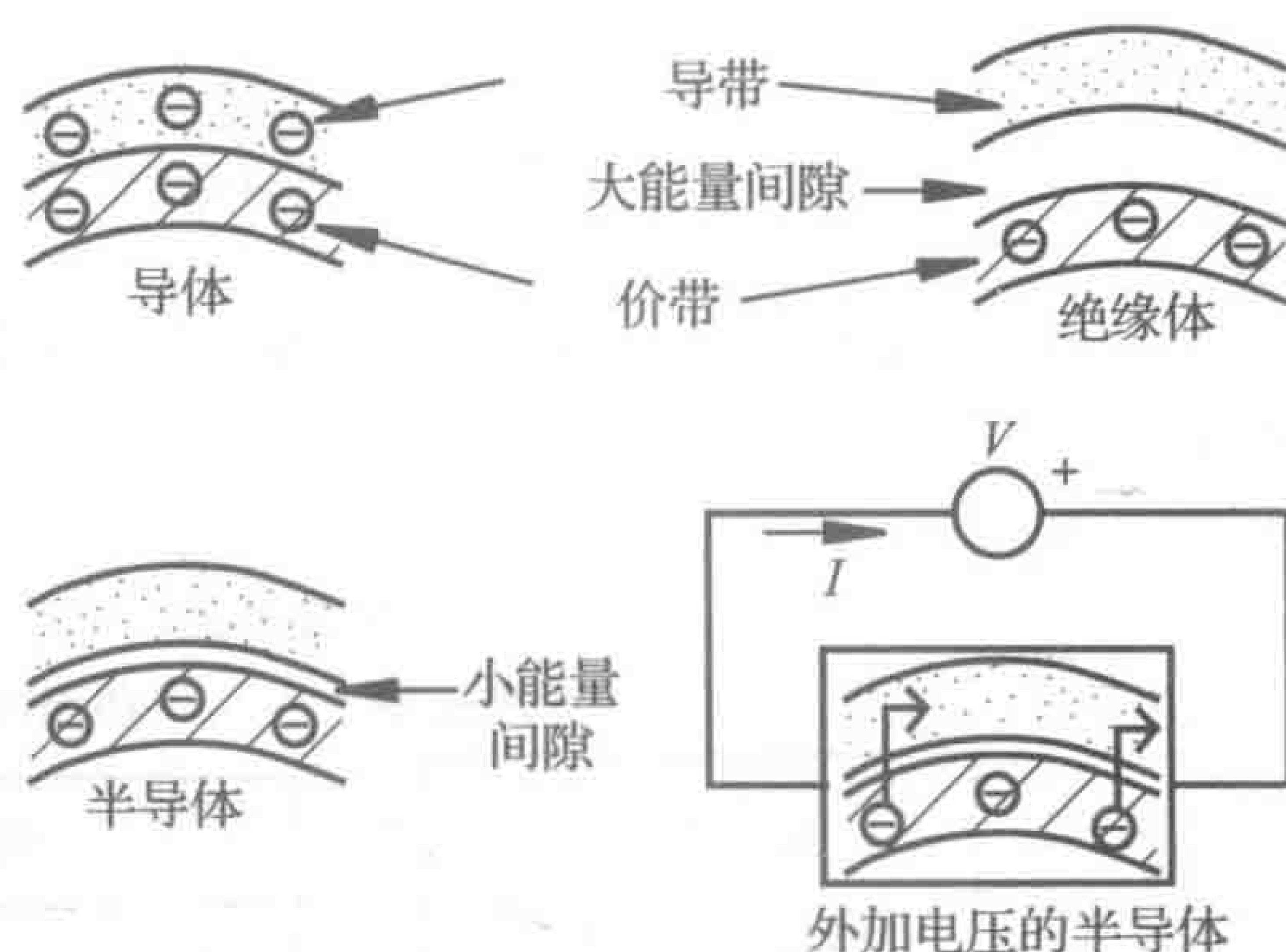


图 3-1　材料的价带和导带

在半导体晶体中，价电子可以跳到导带，其在价带中留下的空位称为空穴。来自附近原子的价电子可以移动到空穴中，在其原来的位置处留下另一个空穴，这种事件连续发生从而形成电流，这也可以认为是空穴移动产生的，其方向可以认为是空穴移动的方向或电子移动的反方向，两者的实际效果是一样的，所以本·富兰克林认为电流是正电荷的移动产生的也不是完全错误的。

通过将少量来自元素周期表的Ⅲ族或Ⅴ族的元素插入半导体的晶格中，可以显著改变纯半导体晶体的性质。这些元素，称为**掺杂剂**，可以扩散或注入到半导体中。硅的薄晶体(通常称为芯片)通过沉积并且扩散到表面的微型掺杂图案所形成的器件是所有现代电子学的基础。

当将不同数量和不同类型的掺杂剂添加到半导体中时，其性质会变得非常有趣。如果将掺杂剂掺入到硅的晶格中会发生什么？硅具有 4 个价电子，在晶格中形成对称的电子键。然而，如果将来自Ⅴ族的砷或磷添加到晶格中，则每个掺杂原子的 5 个价电子中的一个电子会自由移动。在这种情况下，掺杂剂称为**施主**元素，因为它增强了半导体的导电性。由于晶格中的电子为电荷载流子，所以得到的半导体称为 **N 型**硅。相反，如果硅掺杂了来自Ⅲ族的硼或镓，晶格中由所谓的**受主**掺杂剂原子取代了硅原子，导致电子缺失形成**空穴**，这是因为掺杂剂原子仅具有 3 个价电子。空穴可以从一个原子移动到另一个原子，从而产生正电流。空穴移动实际上是电子占据了空穴，但看起来像空穴移动。因为空穴是有效的正电荷载流子，所以得到的半导体称为 **P 型**硅。总之，在硅等半导体中掺杂的目的是提高和控制半导体中的电荷载流子的数量。在 N 型半导体中，电荷载流子是电子；在 P 型半导体中，载流子是空穴。正如我们将很快看到的一样，N 型和 P 型半导体材料之间的相互作用是大多数半导体电子器件的基础。

3.3　结型二极管

现代电子器件是通过在半导体材料中不同的掺杂面之间建立微观接口而产生的。如果在邻近 N 型硅的区域制作 P 型硅，则得到 **PN 结**。二极管的 P 型侧称为**阳极**，而 N 型侧称为**阴极**。如图 3-2a、b 所示，在 PN 结处，来自 N 型硅的电子可以扩散到 P 型硅中并占据空穴，产生所谓的**耗尽层**。由于电子的扩散，在薄的耗尽层上会形成小的电场，这导致在耗尽层的两端产生电压差，称为**接触电位**。对于硅，接触电位大约为 0.6～0.7V。由于电子的扩散，接触电位的正侧在 N 型区域中，而负侧在 P 型区域中。注意，我们还没有将该结连接到外部电路。

如图 3-2c 所示，如果电压源连接到 PN 结，电压源的正极侧连接到阳极，负极侧连接到阴极，形成完整的电路，则称二极管外加**正向偏置**。施加的电压会克服接触电位并使得耗尽层变窄。阳极实际上变成空穴源，并且阴极变成电子源，这样使得空穴和电子在 PN

结处被连续补充。随着施加的电压接近接触电位的值(对于硅为 0.6～0.7V)，电流呈指数级增加。该效应可由**二极管方程**定量描述：

$$I_D = I_0\left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1\right) \tag{3-1}$$

其中，I_D是通过结的电流；I_0是反向饱和电流；q 是一个电子的电量(1.60×10^{-19}C)；k 是玻耳兹曼常数(1.381×10^{-23}J/K)；V_D是正向偏置电压；T 是结的热力学温度。

如图 3-2d 所示，如果阳极连接到 N 型硅，阴极连接到 P 型硅，则耗尽层扩大，阻止电子扩散，从而阻止电流通过，此时称 PN 结**反向偏置**。虽然存在**反向饱和电流**(I_0)，但其值非常小(大约 10^{-15}～10^{-9}A)。

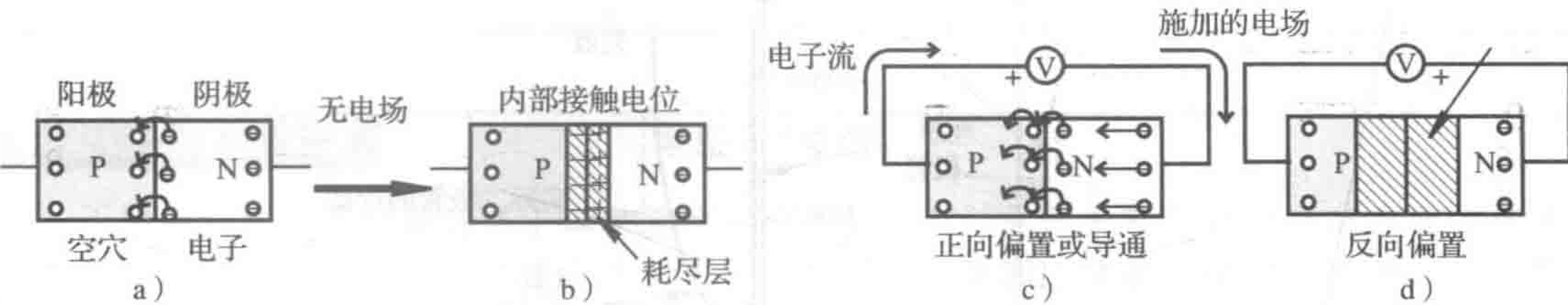


图 3-2　PN 结特性

因此，PN 结仅在一个方向上通过电流，这称为硅**二极管**，有时称为**整流器**。图 3-3 所示为硅二极管的原理图符号。图 3-4 和视频演示 3-1 显示了各种常见二极管的示例，包括小信号二极管、小功率二极管和各种类型的发光二极管。3.3.3 节和 6.12.1 节分别给出 LED 和七段数码管的更多介绍。二极管类似于流体止回阀(单向阀)，只允许流体沿一个方向流动，如图 3-5 所示。下面将会看到 PN 结在晶体管和集成电路等更高级的器件上的应用。此外，也将看到，PN 结的开关动作为所有数字器件的使用奠定了基础。

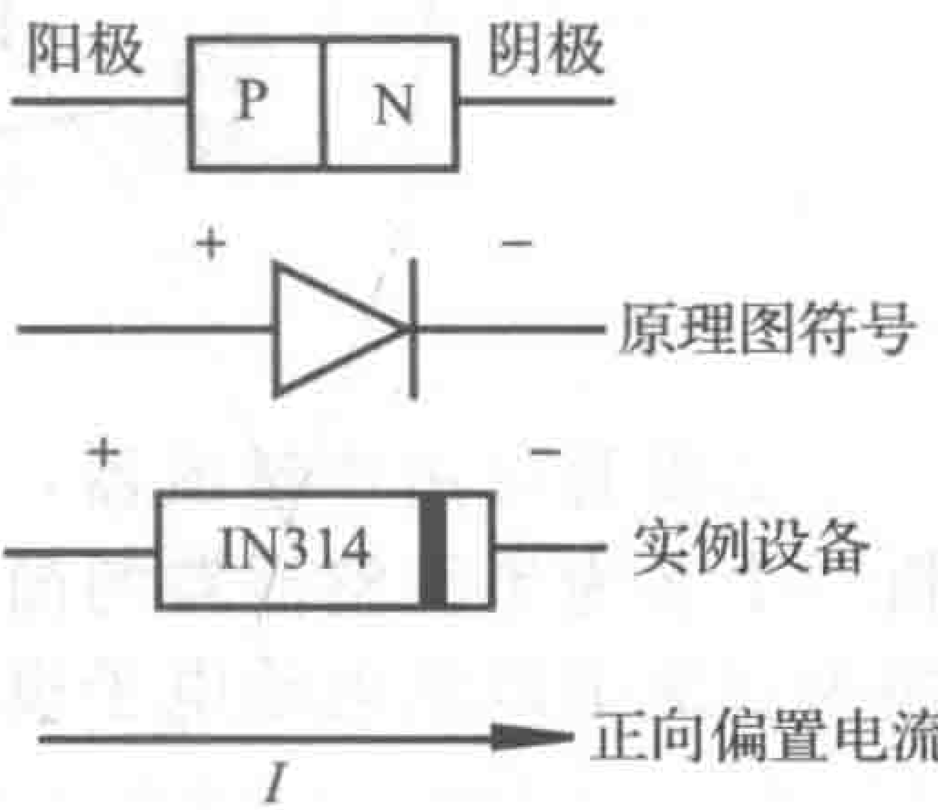


图 3-3　硅二极管

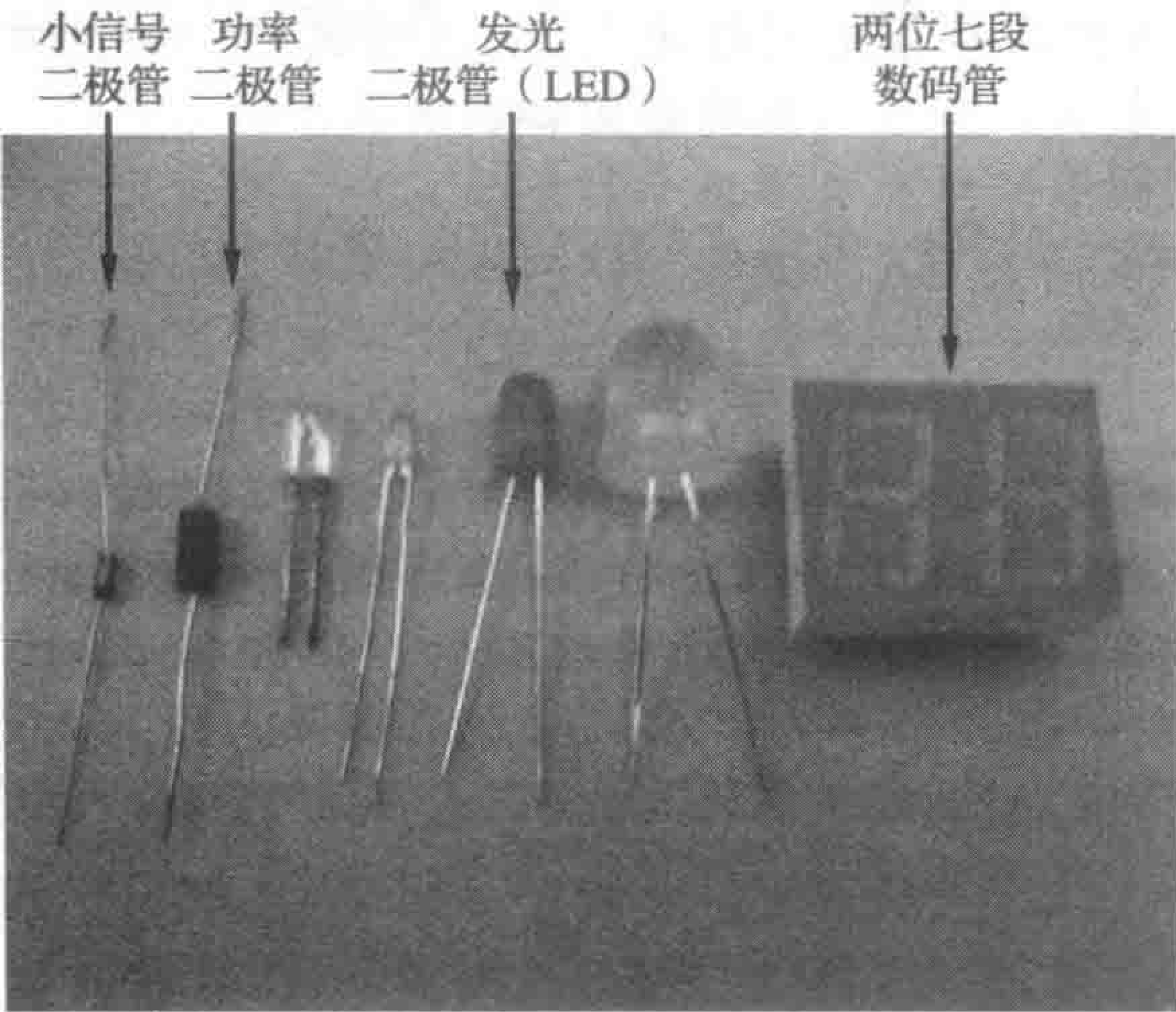


图 3-4　常见二极管的示例

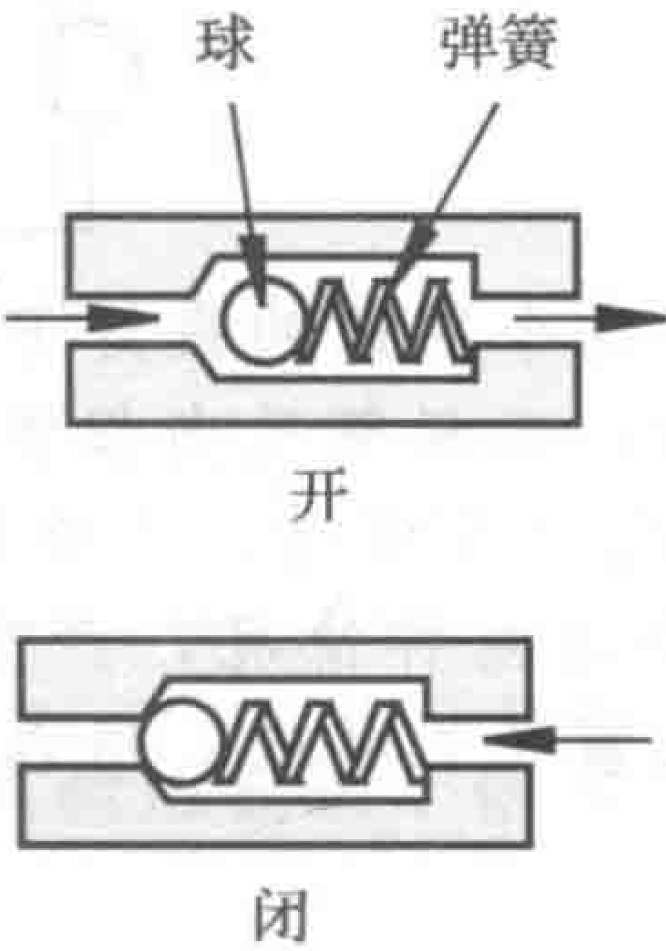


图 3-5　二极管与止回阀的类比

如式(3-1)所示，半导体二极管的电流-电压特性曲线是指数形式的，图 3-6 所示的第一象限(标记为“实际二极管”的曲线)。当正向偏压接近 0.7V 时，电流有非常大的非线性增长。注意，在电压轴的正向和负向使用了不同的刻度。首先通过**理想二极管**模型来近似半导体二极管的行为，理想二极管的电流-电压特性曲线如图 3-6 中的黑色实线所示。该模型意味着对于大于或等于 0 的任何电压，二极管完全导通；反向偏置时，反向饱和电

流假定为0。在实际电路设计中，**实际二极管**的一个好的近似曲线由虚线给出，即当硅二极管正向偏置时，硅二极管上存在0.6～0.7V的压降。总之，理想二极管在正向偏置时具有零电阻，而在反向偏置时具有无限大电阻。电路分析时，如果二极管是正向偏置的，可以用短路代替，如果是反向偏置，则可以用开路替代。实际二极管需要约0.7V的正向偏置电压来实现显著的电流流动。当实际二极管反向偏置时，其可以承受的反向电压限值称为**击穿电压**，此时二极管将随着反向电流的急剧增加而失效。下节将会看到还有一类二极管，名为齐纳二极管，工作于反向偏置区用于满足特殊应用。

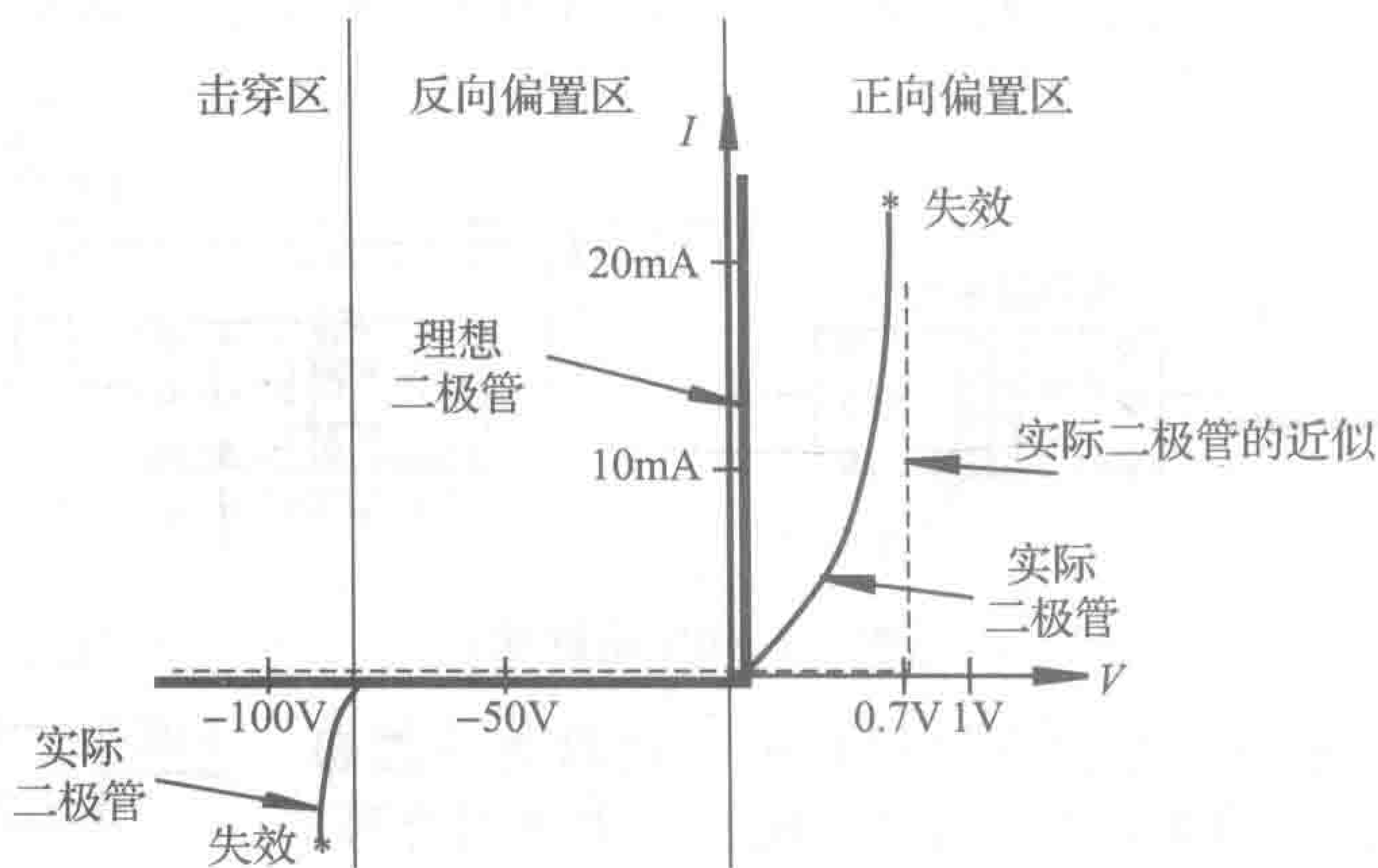
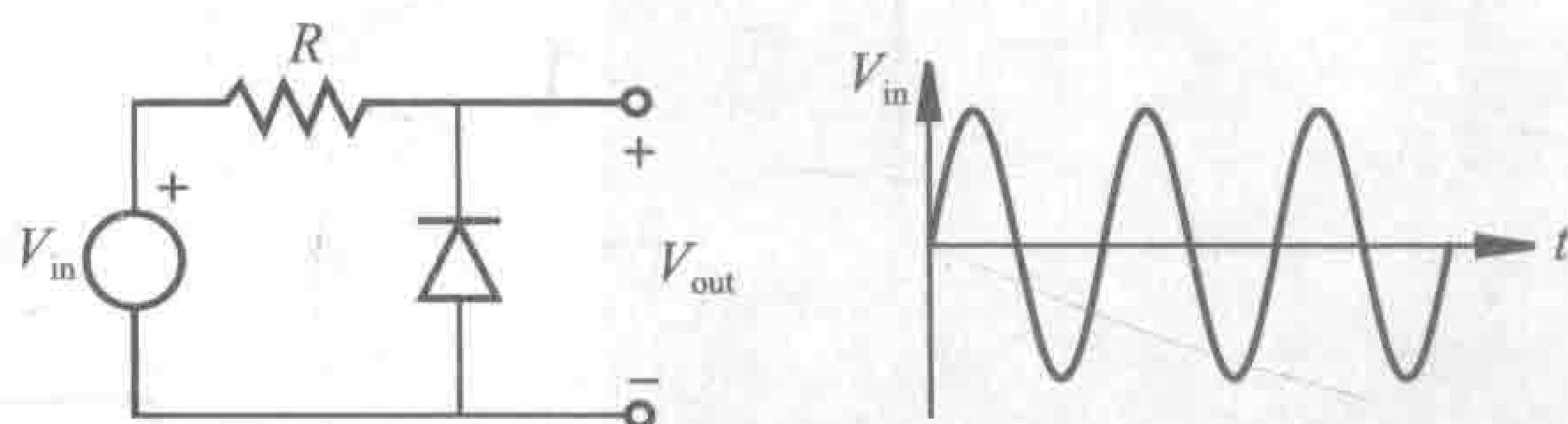


图3-6　理想、近似和实际的二极管曲线

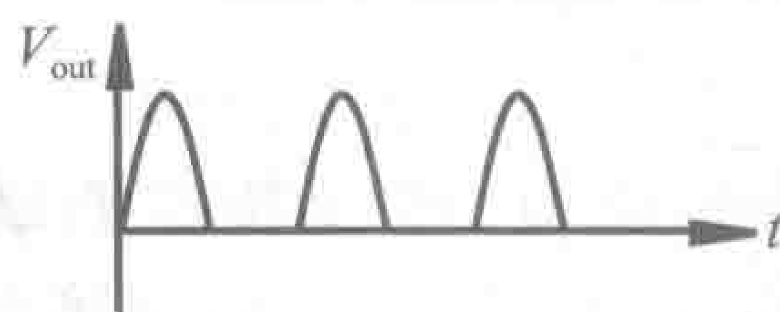
二极管可用作整流器，只允许通过AC信号的正半波或负半波。例3.1说明了如何分析一个名为半波整流器的简单理想二极管电路。整流器电路可用于设计电源，将交流电转换为直流电以供电给电子设备和数字电路。

例3.1　理想二极管的半波整流电路

给定以下包含二极管的电路，此例将说明在给定正弦输入V_{in}的情况下，如何确定输出电压V_{out}。



解决这个问题的最好方法是分别分析在$V_{in}>0$和$V_{in}<0$两种情况下的响应。当V_{in}为正值时，二极管反向偏置，等效为开路，此时没有电流流过电阻，因此输出V_{out}等于V_{in}。当V_{in}为负值时，二极管正向偏置，等效为短路，二极管上没有压降，因此，V_{out}为0V。结合这两种情况，产生的输出波形在正弦波中保留正值，并失去负值(见下图)。因为只保留了正半波，所以这个电路称为**半波整流器**。本章后面的问题3.6研究了全波整流器。



区分不同二极管的重要技术指标的是最大前向电流和发生击穿时的最大反向偏置电压。瞬时浪涌电流和平均电流通常也都会给出，其电路的工作电压和电流不能超过这些限

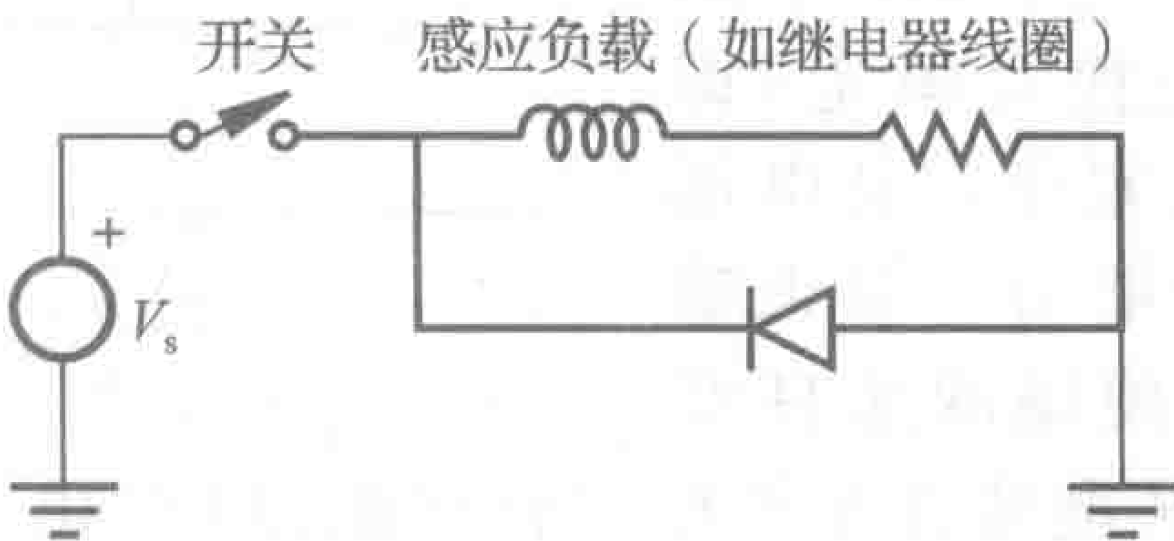
值，而且必须确保电路中的反向偏置电压不超过规定的击穿电压。整流器和功率二极管能够承受很大的电流，但需要安装散热器以便于有效地散除结中产生的热量。二极管导通和关断状态的切换是以纳秒为单位的，这样的切换时间对于大多数应用来说已经足够快了，但是在高速电路设计时这是一个限制。

课堂讨论项目 3.1　　半波整流器中的实际硅二极管

在例 3.1 中式假定二极管是理想的。对实际二极管，假定需要 0.7V 来正向偏置二极管。根据图 3-6 所示的虚线曲线代表的电流-电压关系，画出了半波整流器的输出有何不同。

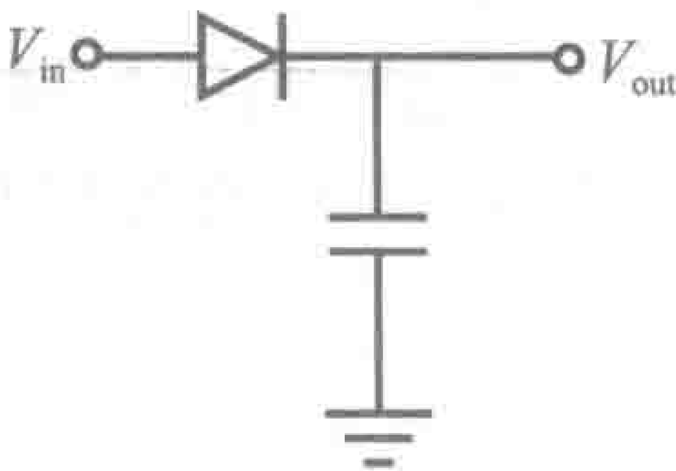
课堂讨论项目 3.2　　电感“冲击”

下图所示的电感电路说明了二极管的一种常见应用，在开关断开时用来减少开关触点之间的电流电弧(火花)。以这种方式使用的二极管称为**反激**、**续流**或**缓冲**二极管。电弧可能损坏开关，并可能对周围电路产生电磁干扰(EMI)。为什么开关断开电感电路时会产生电弧？使用二极管的目的是什么？考虑电感中的电流以及它是如何随时间而变化的。从闭合开关开始，然后描述打开时发生了什么。



课堂讨论项目 3.3　　峰值检测器

下图所示的电路称为**峰值检测器**。当输入端施加时变信号 V_{in} 时，输出 V_{out} 保留了输入信号的最大正值。在什么条件下电容器充电？绘制任意输入信号及其对应的理想输出之间的曲线。如果实际电路中电容“漏电”，即电容上的电荷逐渐消失，此时电路会有什么样的响应？画出“实际”(非理想)电容下的 V_{out} 曲线。



实验练习 4 介绍了二极管及其在基本电路中的应用。该实验还显示了信号二极管和 LED 之间的区别。

3.3.1 齐纳二极管

回顾图 3-6 所示的二极管的电流-电压关系。注意，当足够大的反向偏置电压施加到二极管两端时，二极管允许很大的反向电流流过，这称为二极管**击穿**。对于大多数二极管，击穿值至少为 50V 并且可以达到上千伏。利用这种特性设计了一种特殊类型的二极管，称为**齐纳**、雪崩或稳压**二极管**。这类二极管具有陡峭的击穿曲线和明确的击穿电压，可以在宽电流范围内保持几乎恒定的电压(见图 3-7)，即在电源电压和负载电阻发生变化

的情况下仍然可以保持稳定的直流电压，这种特性使其广泛用于构建简单的电压稳压器。

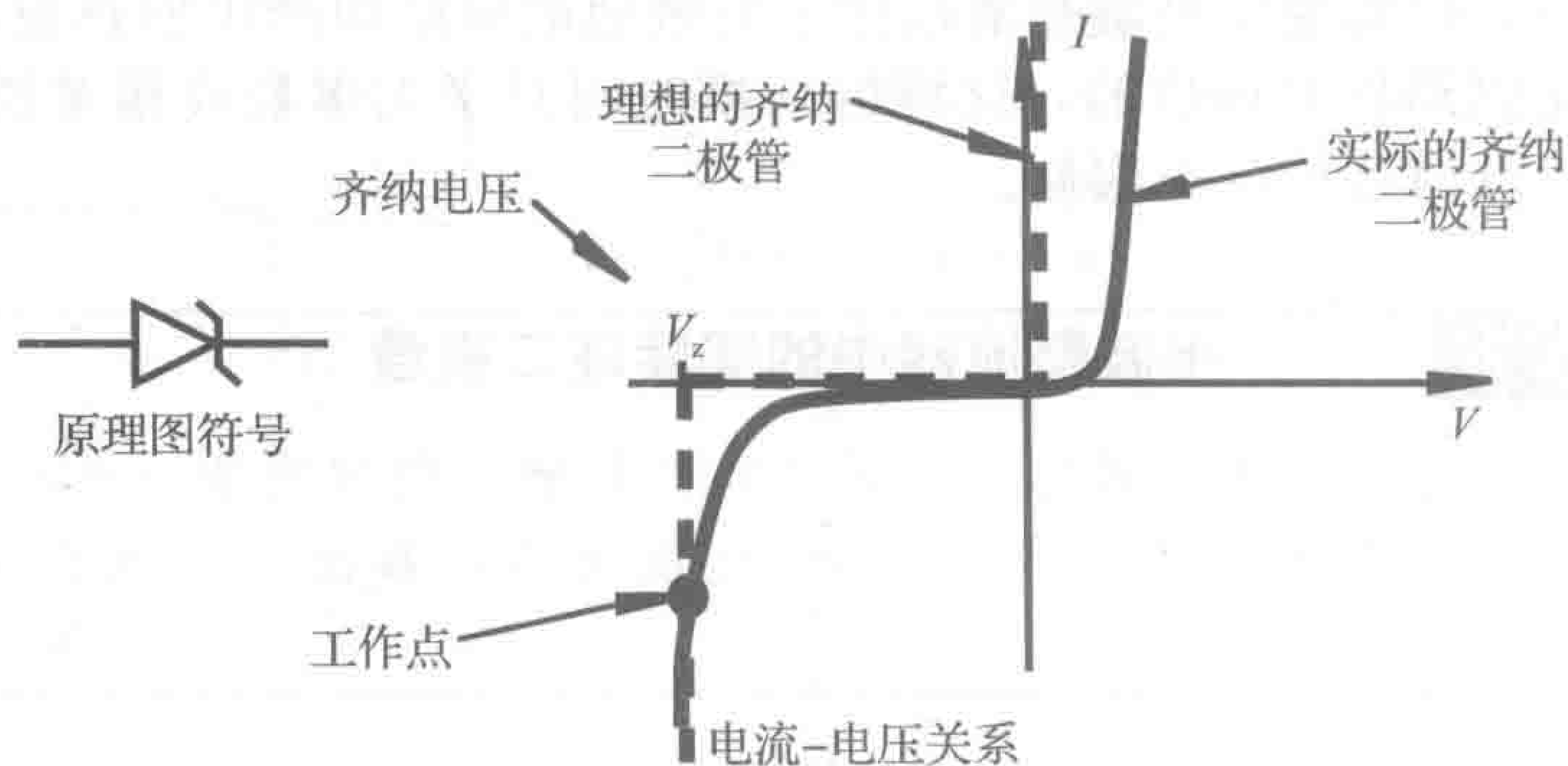


图 3-7　齐纳二极管的符号和电流-电压关系

为了在电路中正确地使用齐纳二极管，齐纳二极管应该施加超过其击穿或**齐纳电压** V_z的反向偏置电压。图 3-8 所示为用齐纳二极管与电阻串联，这个简单电路称为**稳压器**。齐纳二极管根据齐纳电压 V_z来维持或调节电路的输出电压 V_{out}。即使通过齐纳二极管的电流发生改变(图 3-8 中的 ΔI_z)，其输出电压仍然保持相对恒定(即 ΔV_z很小)。对于给定的电流变化，其电压范围的宽窄可以表示稳压的能力。如果输入电压和负载变化不大，即使电源未良好地稳压，该电路也能有效地从电源处获得稳定和较低的 DC 电压输出。

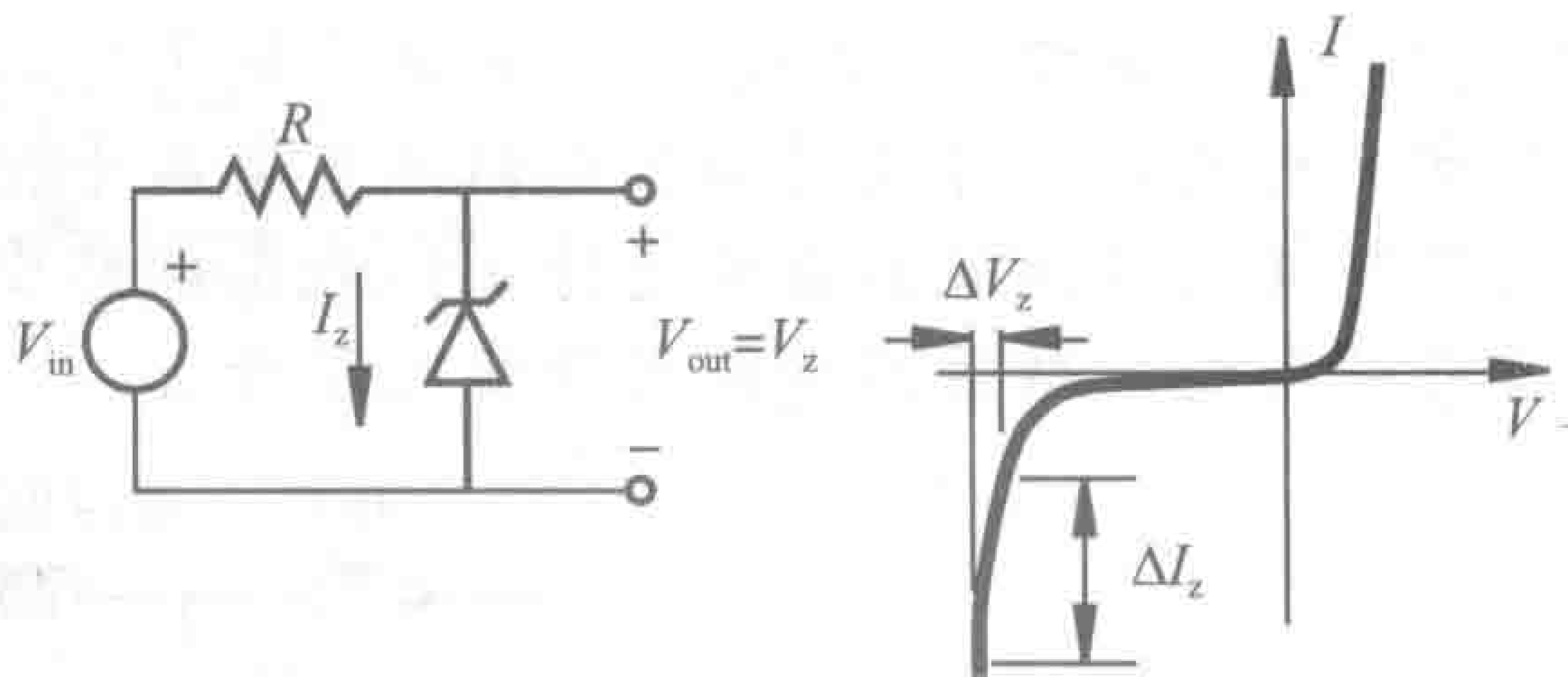


图 3-8　齐纳二极管稳压器

因为在大多数应用中，稳压器的负载随时间变化，并且电压源存在波动，所以必须仔细考虑这些因素对稳定的电压 V_z 的影响。对图 3-8 所示的电路，齐纳电流与电路电压的关系为：

$$I_z = \frac{V_{in} - V_z}{R} \tag{3-2}$$

为了确定电流与电压之间的变化关系，对式(3-2)进行有限差分，得：

$$\Delta I_z = \frac{1}{R}(\Delta V_{in} - \Delta V_z) \tag{3-3}$$

由于齐纳二极管是非线性器件，所以 ΔV_z与 ΔI_z不成正比。但是可以定义齐纳特性曲线在特定工作点处的斜率为动态电阻 R_d，这样就可以用齐纳电压的变化来表示齐纳的电流变化：

$$\Delta I_z = \frac{\Delta V_z}{R_d} \tag{3-4}$$

通常制造商会给出标称齐纳电流 I_{zt}及在标称齐纳电流下的最大动态阻抗 R_d。在使用齐纳二极管的电路设计中，齐纳电流必须超过 I_{zt}，否则，齐纳二极管可能在特性曲线的“拐点”附近工作，此时其稳压性能较差(即齐纳电流的微小变化会导致较大的电压变化)。

将式(3-4)代入式(3-3)并求解 ΔV_z，可以得到在电源电压 ΔV_{in}波动时稳压器输出电压的变化 ΔV_{out}：

$$\Delta V_{out} = \Delta V_z = \frac{R_d}{R_d + R}\Delta V_{in} \tag{3-5}$$

因此，该电路可以视为分压器(用于改变电压)，齐纳二极管在电路工作电流下可以用其动态电阻来表示。

例 3.2 齐纳二极管的稳压性能

对于图 3-8 所示的电路，若其输入电压 V_{in} 的范围是 20～30V，下面确定齐纳二极管的稳压性能。选择美国国家半导体公司生产的 1N4728A 至 1N4752A 系列(具有不同的齐纳电压)中的 1N4744A 齐纳二极管，该齐纳二极管的规格是 15V/1W。根据上述规格确定电阻 R 的阻值。

为了将最大功耗限制在 1W 以下，通过二极管的电流必须限定为：

$$I_{z_{max}} = 1W/15V = 66.7mA$$

因此，根据式(3-2)，电阻 R 的值至少为：

$$R_{min} = (V_{in_{max}} - V_z)/I_{z_{max}} = (30V - 15V)/66.7mA = 225\Omega$$

最接近的可接受的标准电阻值为 240Ω。根据该齐纳二极管的制造规格，其在 17mA 下的动态电阻 R_d 为 14Ω。在该例中，电流 I_z 大于该值，因此齐纳二极管的工作点处于特性曲线调节性能良好的位置上。根据式(3-5)中给定的 R_d 值，可以近似地得到输出电压的范围：

$$\Delta V_{out} = \Delta V_z = \frac{R_d}{R_d + R}\Delta V_{in} = \frac{14\Omega}{(14+240)\Omega} \times (30-20)V = 0.55V$$

该值表示电路的电压调节能力，可将其表达为相对输出电压的百分比：

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \times 100\% = \frac{0.55V}{15V} \times 100\% = 3.7\%$$

课堂讨论项目 3.4 负载对稳压器设计的影响

例 3.2 忽略了负载电流。负载对分析结果有什么影响？

图 3-9 所示的是一个简单的稳压电路，其中 R_L 是负载电阻，V_{in} 是非稳压，其值超过齐纳电压 V_z。该电路的目的是在负载上提供恒定的 DC 电压 V_z，并产生相应的恒定电流。向包含数字集成电路的系统提供稳定的可调节的电压是常见的应用。

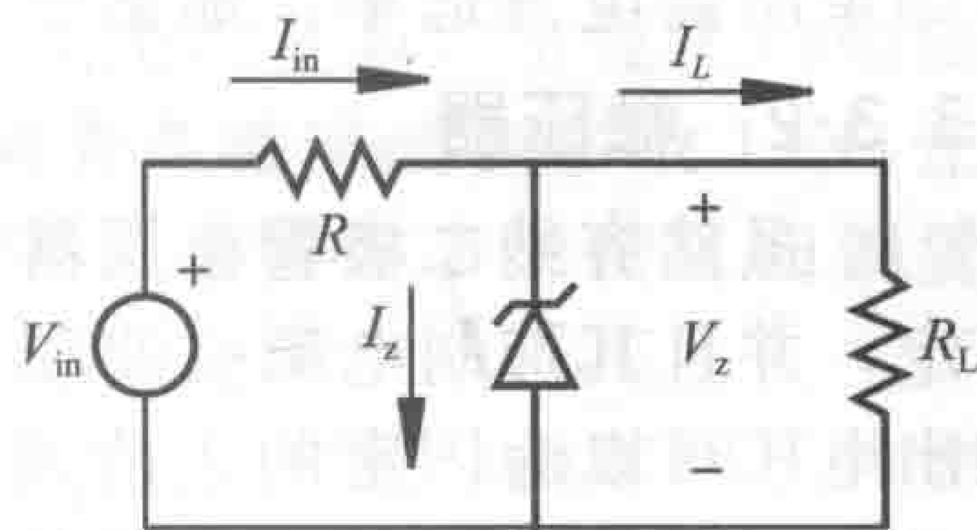


图 3-9 齐纳二极管稳压电路

如果假设齐纳二极管是理想的(即其击穿电流-电压曲线是垂直的)，则可以得出一些关于稳压电路的结论。首先，只要齐纳二极管被反向击穿，负载电压就将是 V_z。因此，负载电流 I_L 为：

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} \tag{3-6}$$

其次，负载电流将是非稳定的输入电流 I_{in} 和齐纳二极管电流 I_z 之差：

$$I_L = I_{in} - I_z \tag{3-7}$$

只要 V_z 恒定且负载不变，I_L 就保持恒定。这意味着二极管电流的改变用来吸收来自非稳压源的变化。

最后，非稳压源的电流 I_{in} 由下式给出：

$$I_{in} = \frac{V_{in} - V_z}{R} \tag{3-8}$$

R 称为限流电阻，因为它限制了齐纳二极管消耗的功率。如果 I_z 太大，齐纳二极管将会失效。

设计实例 3.1　齐纳二极管稳压器设计

假设需要用图 3-9 所示的稳压电路设计一个 15V 的直流稳压电源，使其为机电一体化系统供电。此外，假设只能用标称值为 24V 的不太稳定的直流稳压源 V_{in}来设计。

齐纳电流 I_z会随着负载 R_L值的改变而改变，随着 R_L变大 I_z增大，随着 R_L变小 I_z减小。如果知道最大可能的负载电阻(假设输出不是开路)，那么就可以确定齐纳二极管的功耗特性，并选择一个限流电阻。结合式(3-6)和式(3-7)并用负载的最大值 $R_{L_{max}}$ 得到：

$$I_{z_{max}} = I_{in} - \frac{V_z}{R_{L_{max}}}$$

这是齐纳二极管中流过的最大电流，齐纳二极管的功耗为：

$$P_{z_{max}} = I_{z_{max}} V_z = \left(I_{in} - \frac{V_z}{R_{L_{max}}}\right) V_z$$

I_{in}由限流电阻 R 控制。代入式(3-8)得到：

$$P_{z_{max}} = \left(\frac{V_{in} - V_z}{R}\right) V_z - \frac{V_z^2}{R_{L_{max}}}$$

进一步，对于该问题，假设 $R_{L_{max}}$ 是 240Ω，并希望选择功率为 1W 的齐纳二极管。因此：

$$1\text{W} = \frac{24\text{V} - 15\text{V}}{R_{min}} \times 15\text{V} - \frac{225\text{V}^2}{240\Omega}$$

这样即可确定所需的最小限流电阻 R：

$$R_{min} = 69.7\Omega$$

最接近的可接受的标准电阻值为 75Ω。

总之，齐纳二极管可用在从单个较高的电压源处获得较小的稳定电压的电路中。设计齐纳二极管电路时，必须在给定二极管功率限制的情况下选择适当的限流电阻。在用 9V 电池供电的简单的机电一体化系统设计中，并且需要用 5V 直流电源给数字元器件供电时，如果所需电流适中，那么一个设计良好的齐纳稳压器是一种经济和有效的解决方案。

3.3.2　稳压器

虽然齐纳二极管稳压器便宜且使用简单，但是它有一些缺点：输出电压不能精确设定，并且其抑制电源纹波和负载变化的能力有限。稳压器是一种专用的半导体器件，其输出电压可以为固定的正值或负值或者为非标准的且可调节的电压值。一组易于使用的稳压器是如 78XX 这种形式的三端稳压器，其最后两位数字(XX)表示标准输出电压值：5V(XX 为 05)、12V 或 15V，如 LM7815C 稳压器，其输出稳压值为 15V，电路如图 3-10 所示。

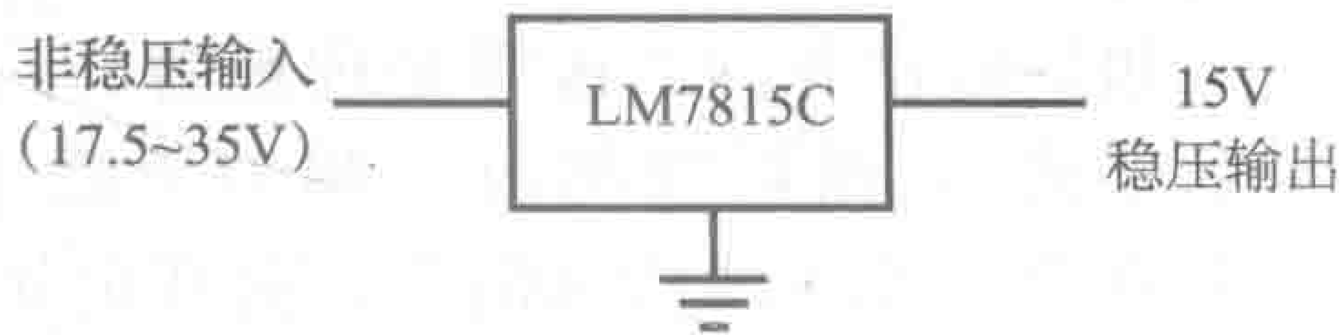


图 3-10　15V 直流稳压电源

可以使用这种设计代替设计实例 3.1 中的齐纳稳压器(见课堂讨论项目 3.5)。78XX 可以提供高达 1A 的电流，具有内部过载保护。使用这种器件，设计人员无须同设计齐纳稳压器一样进行计算。78XX 系列稳压器有互补形式的 79XX 系列稳压器，它们可一起用于设计+/−电压源。

课堂讨论项目 3.5　78XX 系列稳压器

在设计实例 3.1 中，使用齐纳二极管来提供期望的直流电压。现在用 78XX 稳压器实现相同的功能，确定稳压器并描述其特性。

在某些情况下，制造商生产的标准系列元器件中没有提供所需的稳压源。此时，可以使用可调三端稳压器，通过增加外部电阻实现输出电压的调节。如LM317L通过增加两个外部电阻提供可调节输出，如图3-11所示。输出电压由下式给出：

$$V_{out} = 1.25\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\text{V} \quad (3\text{-}9)$$

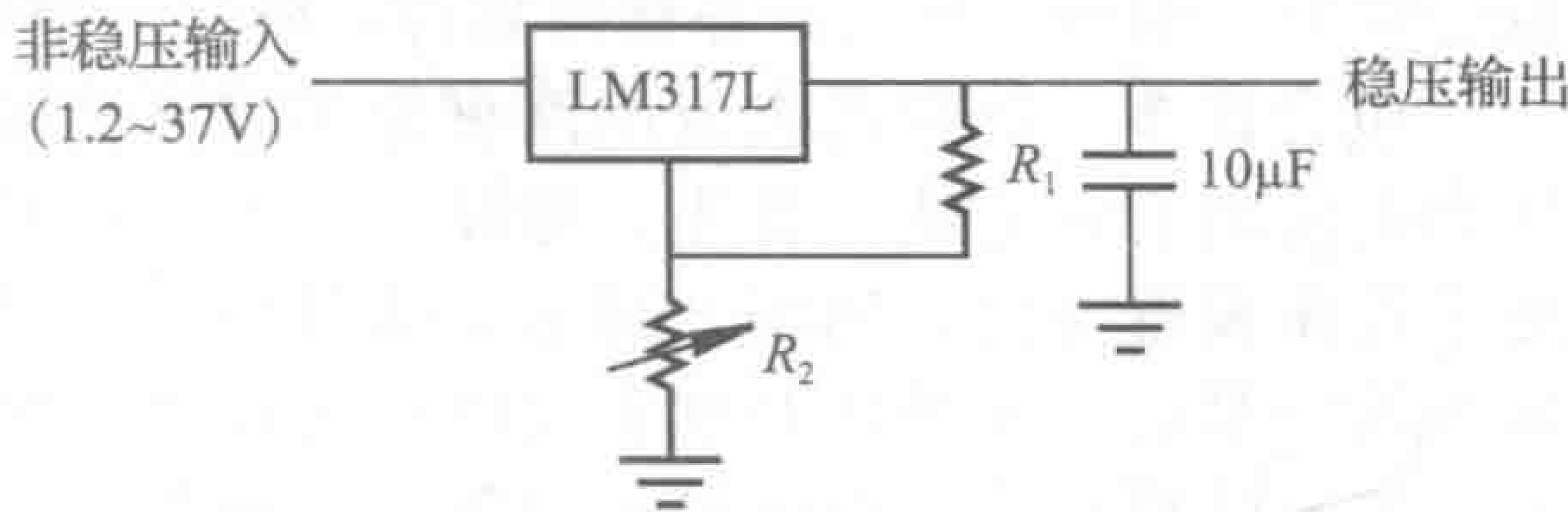


图3-11　1.2～37V的可调稳压器

该系列可调稳压器有更高的额定电流和额定电压。

三端稳压器输出精确，可以抑制输入端纹波和电压尖峰，具有大约0.1%的调节能力，输出十分稳定，这使得它们广泛应用于机电一体化系统设计中。

课堂讨论项目3.6　汽车充电系统

典型的汽车具有12V直流电气系统，其铅酸蓄电池由皮带驱动的交流发电机充电，发电机的频率和电压随着发动机的转速而变化。在交流发电机和电池之间必须进行什么类型的信号调节？如何做到这一点？

3.3.3　光敏二极管

发光二极管是在正向偏置时发射光子的二极管。典型的LED及其原理图符号如图3-12所示。正极或阳极引线通常是两个引线中较长的那个。LED通常包在有色塑料中，这样可以增强由二极管产生的波长并且有助于将光聚焦成束。光的强度与流过器件的电流大小有关。LED可以制造成各种颜色，但是红色、黄色和绿色通常是最常见和最便宜的。需要重点记住的是，当正向偏置时，LED具有1.5～2.5V的压降，这稍大于小信号硅二极管。只需要几毫安的电流就可以稍稍点亮LED。在电路设计时加入一个串联的限流电阻非常重要，这可以防止过大的正向电流，以免迅速损坏LED。在数字(5V)电路设计中，通常用330Ω的电阻与LED串联，图3-13显示了典型的LED电路。注意，电流大约限制在9mA(3V/330Ω)，这足以完全点亮LED，并且9mA也在制造商提供的大多数LED正向电流的范围内。实验练习4演示如何正确搭建LED电路，并显示需要多大的正向偏置电压和电流才能完全点亮LED。

前面章节提到PN结对光照敏感，作为一种特殊类型的二极管，**光敏二极管**用于检测光子。图3-14所示为光敏二极管用在电路中感知光照。注意，对光的感应是通过流过二极管的反向电流来实现的。使用这些器件时，需要相当多的光子来提供可检测的电压。光敏晶体管(见3.4.6节)是一个更灵敏的器件，尽管其响应速度较慢。光敏二极管是基于量子效应的，如果光子在反向偏置的PN结中激发载流子，就会有发与发光强度成比例的非常小的电流流动。光敏二极管的灵敏度取决于光的波长。

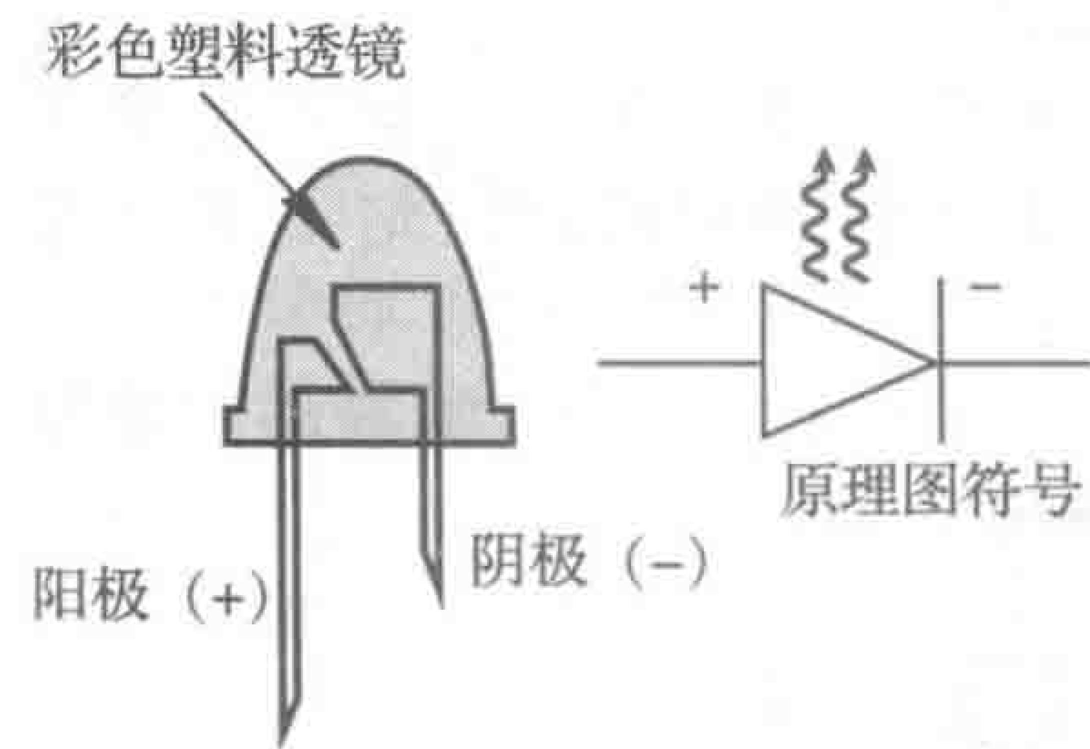


图3-12　发光二极管

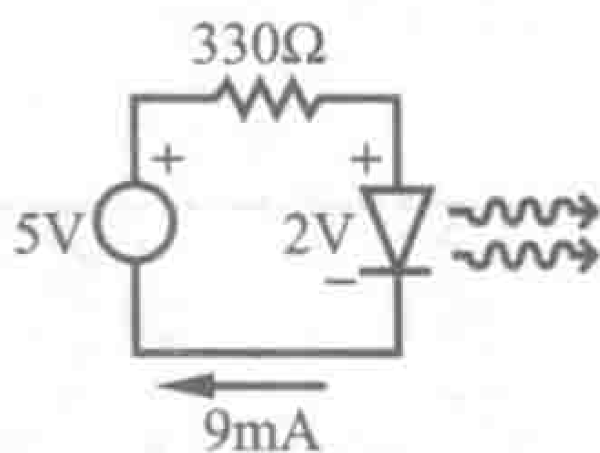


图3-13　数字系统中典型的LED电路

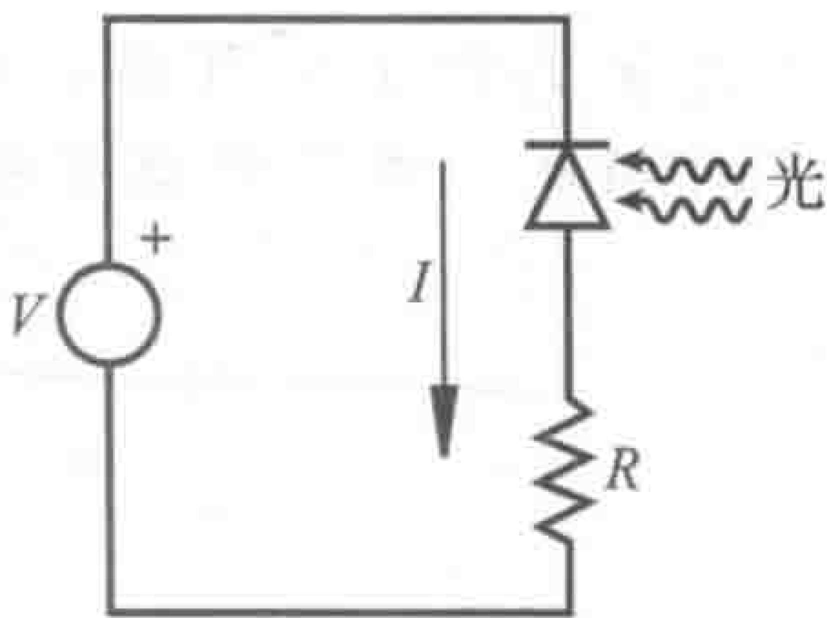


图3-14　光敏二极管光检测电路

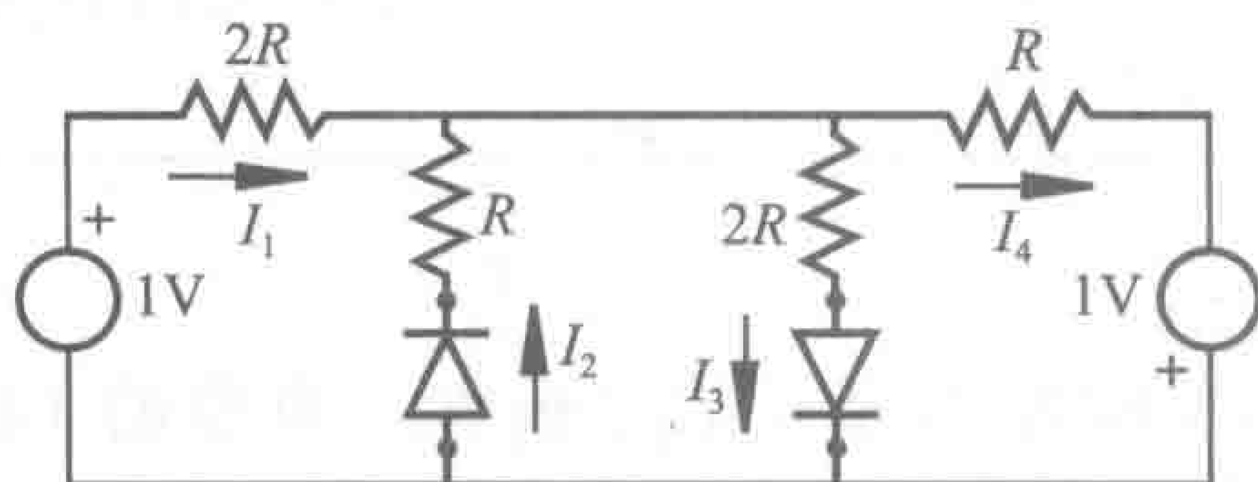
3.3.4 二极管电路分析

虽然前述分析的大多数电路中只包括单个二极管，但是也有一些电路中会出现多个二极管的情形。因为二极管是非线性器件，所以不能采用简单的线性电路的分析思路来分析。

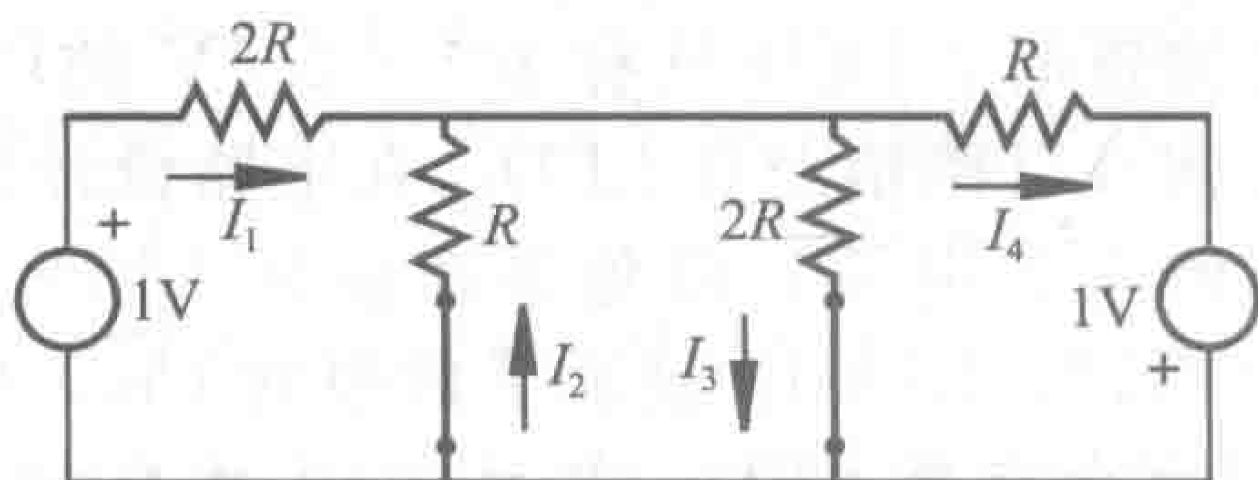
包含许多二极管的直流电路可能不容易直接进行分析。下述过程是确定这些电路中电压和电流的直接方法。首先，假设每个电路中元器件的电流方向。然后，如果假定的电流处于反向偏置方向，则用开路来等效替换每个二极管，如果处于正向偏置方向，则用短路来等效。最后，再使用基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律计算电路回路中的压降和电流。如果计算得到的电流符号与假定方向相反，则前述假设错误，必须改变电流的方向并重新分析电路。使用不同的电流方向组合重复上述过程，直到假定和计算的压降和电流一致为止。

例 3.3　　具有多个二极管的电路分析

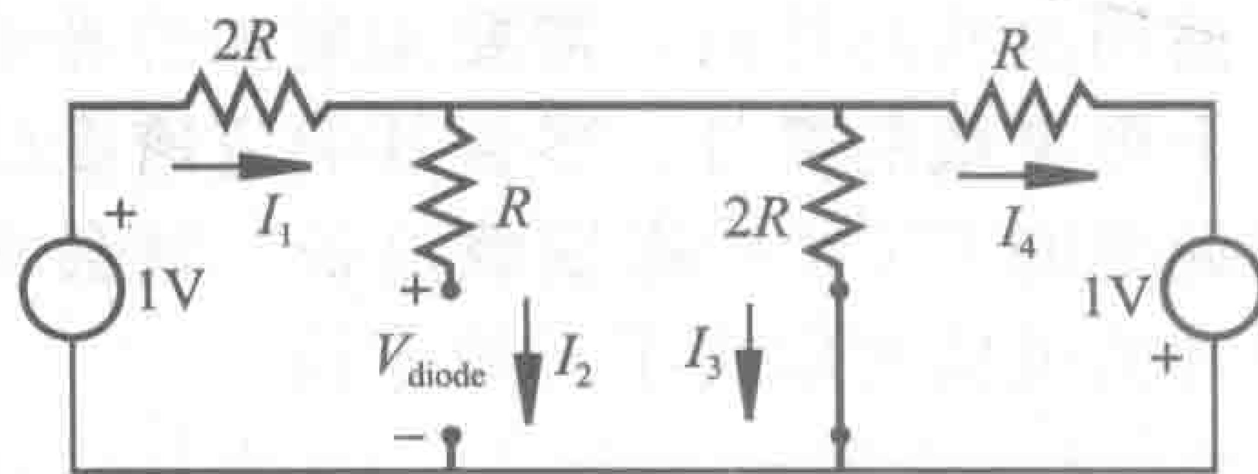
该实例给出了上述分析过程在包含两个理想二极管的电路中的应用，即确定下图所示的电路中所有的电流和电压。首先，任意假设如图所示的电流方向。



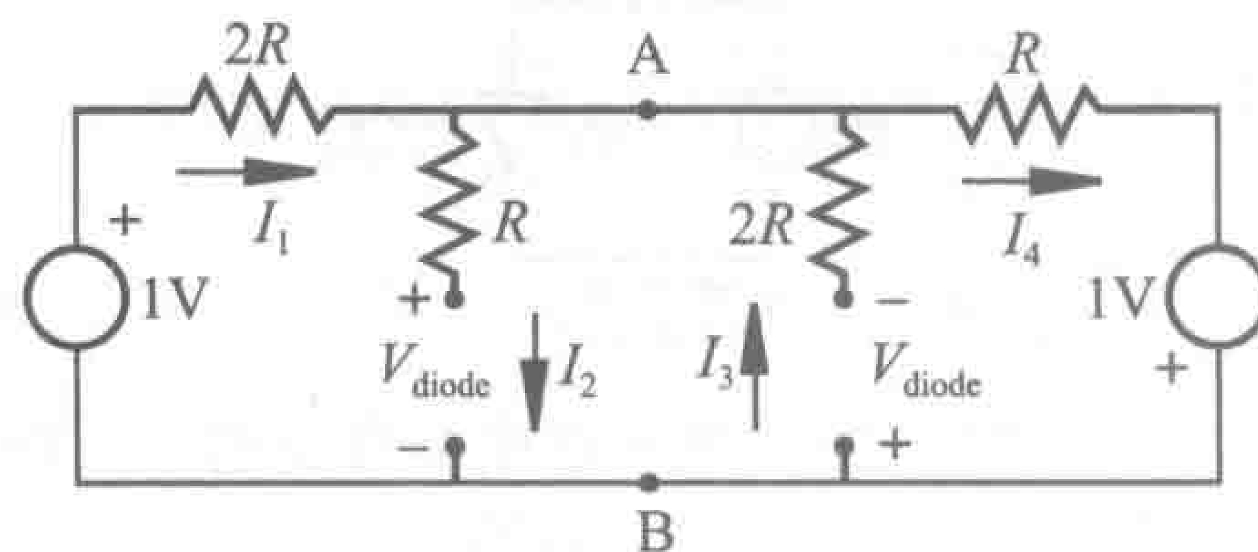
根据假设的电流方向，可以看出两个二极管都假设为正向偏置，所以用短路代替每个二极管。等效电路如下：



对包含 I_2 和 I_3 的环路应用基尔霍夫电压定律，可以得到 $I_2=-2I_3$。根据这个结论，可以得知 I_2 和 I_3 中的一个电流方向假设错误，所以需要改变初始假设。假设 I_2 的方向与首次选择的方向相反。根据这个假设，左侧的二极管因为反向偏置，所以用开路代替。等效电路如下图所示：

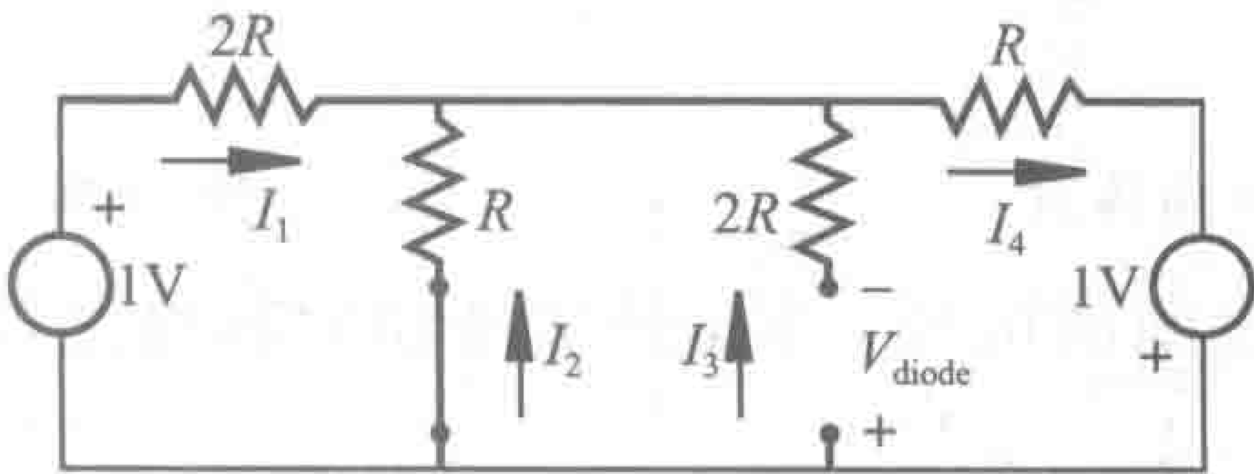


在这个电路中 $I_2=0$，V_{diode} 是反向偏置的二极管两端的电压。将基尔霍夫电压定律应用于包含 I_3 和 I_4 的环路，结果是 $I_3<0$。因此，之前假设的 I_3 方向不正确。假定 I_3 与之前的方向相反，并用开路替换二极管。得到的电路如下图所示：



注意，I_2和I_3在该电路中都为0，每个反向偏置的二极管在其两端具有非零电压。两个含有二极管的分支电路是并联的，因此这两个分支具有相同的电压，即节点A和B两端的电压。因为流过二极管的电流假定为零，所以二极管支路上的电阻没有压降。因此，每个二极管上的电压必须相同(幅值和极性)，但是实际电路并非如此，因此假定的电流方向还是不正确。

如下图所示的电流方向，是还没有涉及的唯一组合。



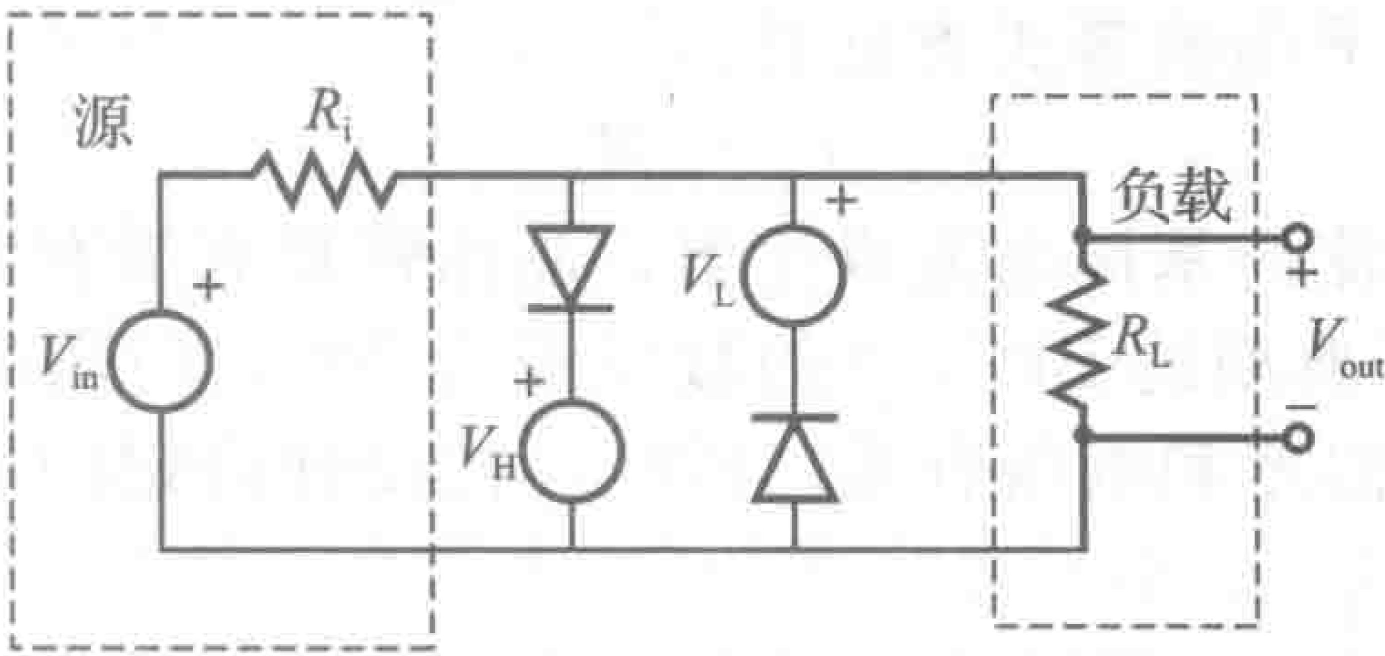
分析这个电路(见问题3.9)，可以发现$I_2>0$、$V_{diode}>0$，与假设一致，因此结果是正确的。

该例全面检测了二极管偏置的每一种可能组合。如果凭借运气或者有根据的假设，可能会在更早的时候找到正确的组合，这样就不需要进行其他假设了。

上述例子假设当二极管正向偏置时，可以用短路来代替，这意味着正向偏置电压为0。该过程必须修正才能为实际二极管建立更加精确的模型。考虑正向偏置电压时，应该由等于二极管正向偏置电压值的小电压源来等效二极管，而不是用短路。

课堂讨论项目 3.7　电压限制器

下图所示的电路中，二极管部分称为**电压限制器**。解释原因？通过画出输入和输出波形来描述电路的特性。注意：$V_H>V_L$。



3.4 双极型晶体管

双极型晶体管是促使电子时代、集成电路和最终整个数字领域出现的突出发明。晶体管通过影响人们日常生活中的一切，而彻底地改变了人类的存在。在本节，从理解晶体管功能所需的物理基础开始，展示其如何用来搭建一些重要的电路。

3.4.1 双极型晶体管物理特性

半导体二极管由P型和N型硅相邻组成，每个区域连接到一根引线上。相比之下，**双极型晶体管**(BJT)由3个相邻的掺杂硅区组成，每个区域连接至外部引线。有两类BJT：NPN和PNP晶体管。最常见的类型是NPN BJT，下文将通过一些例子对其进行详细讨论。如图3-15所示，它由两个N型硅区域或硅层及夹在中间的P型薄硅层组成，3根引线连接到这三个区域，分别称为**集电极**、**基极**和**发射极**。如图3-15中粗体n所示，发射极比集电极的掺杂浓度更高，因此集电极和发射极不可互换。相应的电路原理图符号也在图中给出，并定义和标记了其电流和电压。PNP BJT的结构、原理图和符号如图3-16所示。

本节将侧重介绍图 3-15 所示的 NPN 双极型晶体管。

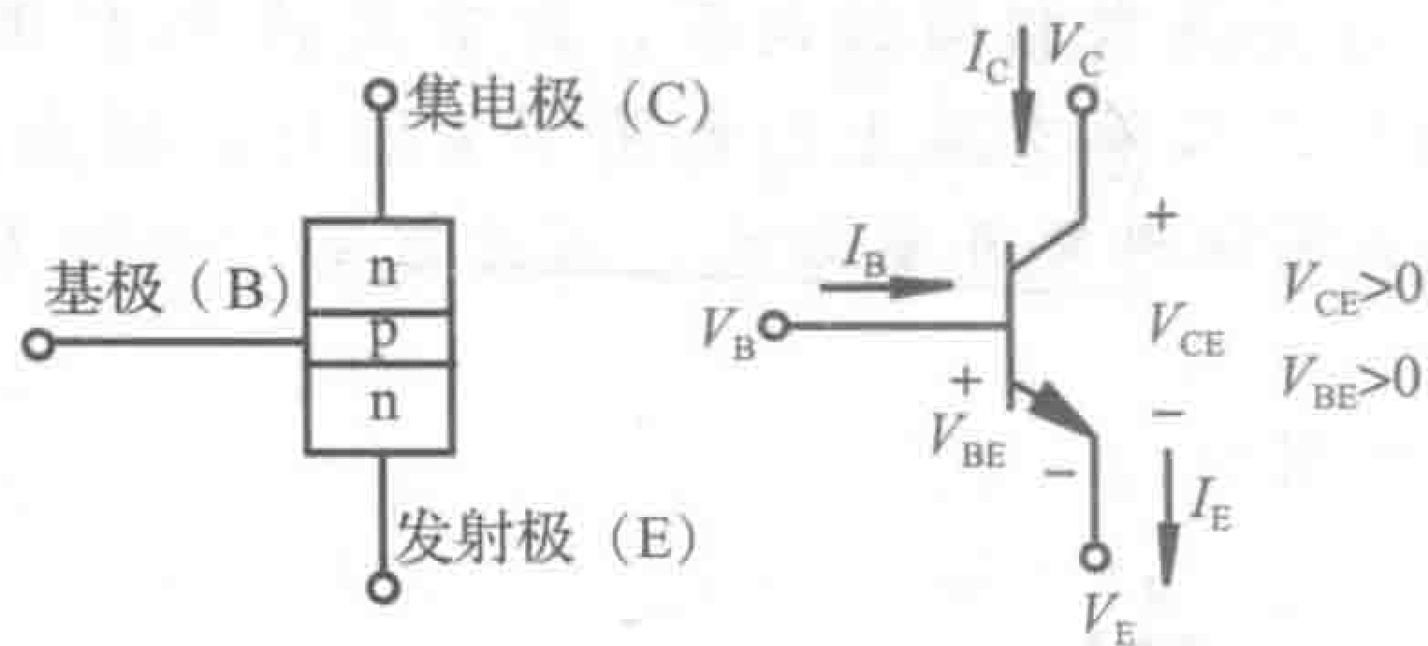


图 3-15　NPN 双极型晶体管

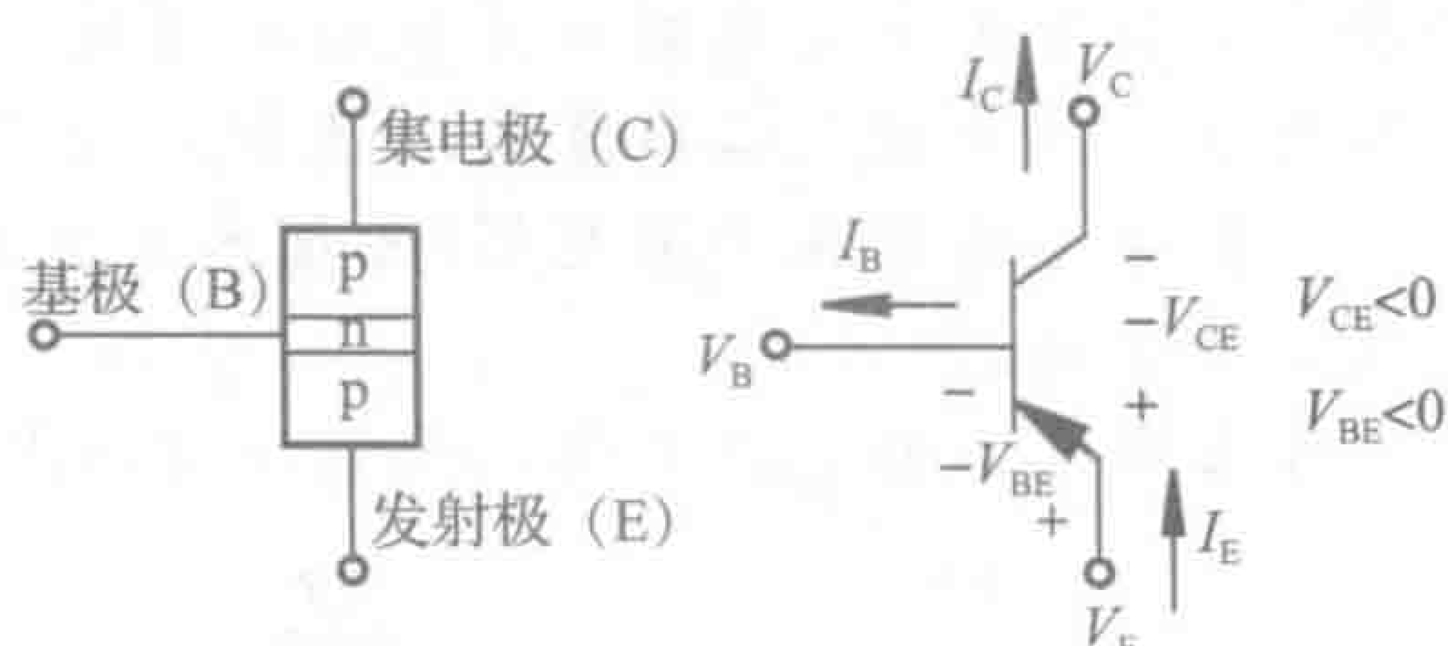


图 3-16　PNP 双极型晶体管

V_{CE}是集电极和发射极之间的电压，V_{BE}是基极和发射极之间的电压。晶体管中电流和电压的关系如下：

$$I_E = I_C + I_B \tag{3-10}$$

$$V_{BE} = V_B - V_E \tag{3-11}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \tag{3-12}$$

当晶体管导通时，基极-发射极必须是正向偏置($V_{BE}=0.7V$，因此 $V_B=V_E+0.7V$)。在这种情况下，会有大的集电极电流($I_C>0$)和小的基极电流($I_B \leqslant I_C$)流入到发射极，在集电极到发射极电路间存在一个小的压降($V_E=V_C-V_{CE}$)。

为了理解 NPN BJT 的功能，首先考虑基极-发射极之间的 PN 结。由于该 PN 结正向偏置($V_B>V_E$)，所以电子从发射极 N 型区扩散到基极 P 型区。因为基极-集电极 PN 结反向偏置($V_C>V_B$)，所以存在通常防止电子从基极流入集电极的耗尽区。然而，因为基极制造得非常薄并且发射极 N 型区比基极掺杂的浓度高，所以来自发射极的大部分电子通过基极区以足够的能量加速穿过耗尽区，并进入集电极而不与基极中的空穴重组。注意，电流的方向是电子运动的相反方向，结果是小的基极电流 I_B从基极流向发射极，并且更大的电流 I_C从集电极流向发射极。小的基极电流控制较大的集电极电流，因此 BJT 可用作电流放大器。该特性可以用下面的等式类近似：

$$I_C = \beta I_B \tag{3-13}$$

上式说明了集电极电流与基极电流成比例，晶体管具有 β 倍的放大系数。制造商通常使用符号 h_{FE}代替 β。对于典型的 BJT，β 的数量级为 100，但随晶体管的不同可以有显著的差异。放大倍数 β 也与温度和电压有关，因此，在设计特定的晶体管电路时不应假设存在精确的关系。

由于 BJT 的基极-集电极电流特性，因此它可以用于放大电流或简单地打开和关闭电流。BJT 的开关特性为大多数数字计算机奠定了基础，因为它容易表示两状态的二进制。本书更多关注在机电一体化系统中应用 BJT 的开关设计，而不是放大器设计。放大器设计需要对 BJT 进行更深入的研究，它在电气工程微电子教科书中有全面介绍。

3.4.2　共射极晶体管电路

如果 BJT 的发射极接地，并将输入电压施加到基极，则得到图 3-17 所示的**共射极**电路。随着基极电流逐渐增加，当 V_{BE}大约为 0.6V 时，晶体管的基极-发射极导通。此时，I_C开始流动并且与 I_B基本成比例($I_C=\beta I_B$)。随着 I_B进一步增加，V_{BE}缓慢增加到约 0.7V，同时 I_C以指数级上升。随着 I_C上升，R_C两端的压降也增加，V_{CE}会下降接近地。但是不会完全与地相同，否则，基极到集电极的 PN 结也将正向偏置。当 V_{CE}达到其最小值时，晶体管进入饱和状态。在这种模式下，集电极电流由 R_C决定，I_C和 I_B之间的线性关系不再成立。

针对不同的基极电流 I_B，绘制集电极电流 I_C与集电极-发射极电压 V_{CE}之间的曲线，由此产生的曲线族(见图 3-18)描述了晶体管的**共射极特性**。晶体管具有**截止区**(无集电极

电流流动)、**放大区**(集电极电流与基极电流成比例)和**饱和区**(基极电流充分大，集电极电流严格地由集电极电路控制)。当设计晶体管开关时，需要保证晶体管在导通时完全饱和。完全饱和时，V_{CE}处于最小值，对于 BJT，V_{CE}为约 0.2V。因此，在饱和状态下，基极-发射极 PN 结正向偏置($V_{BE}=0.7V$)，从集电极到发射极有一个小的压降($V_{CE}=0.2V$)，晶体管引线上的电压关系如下：

$$V_B = V_E + 0.7V \tag{3-14}$$

$$V_C = V_E + 0.2V \tag{3-15}$$

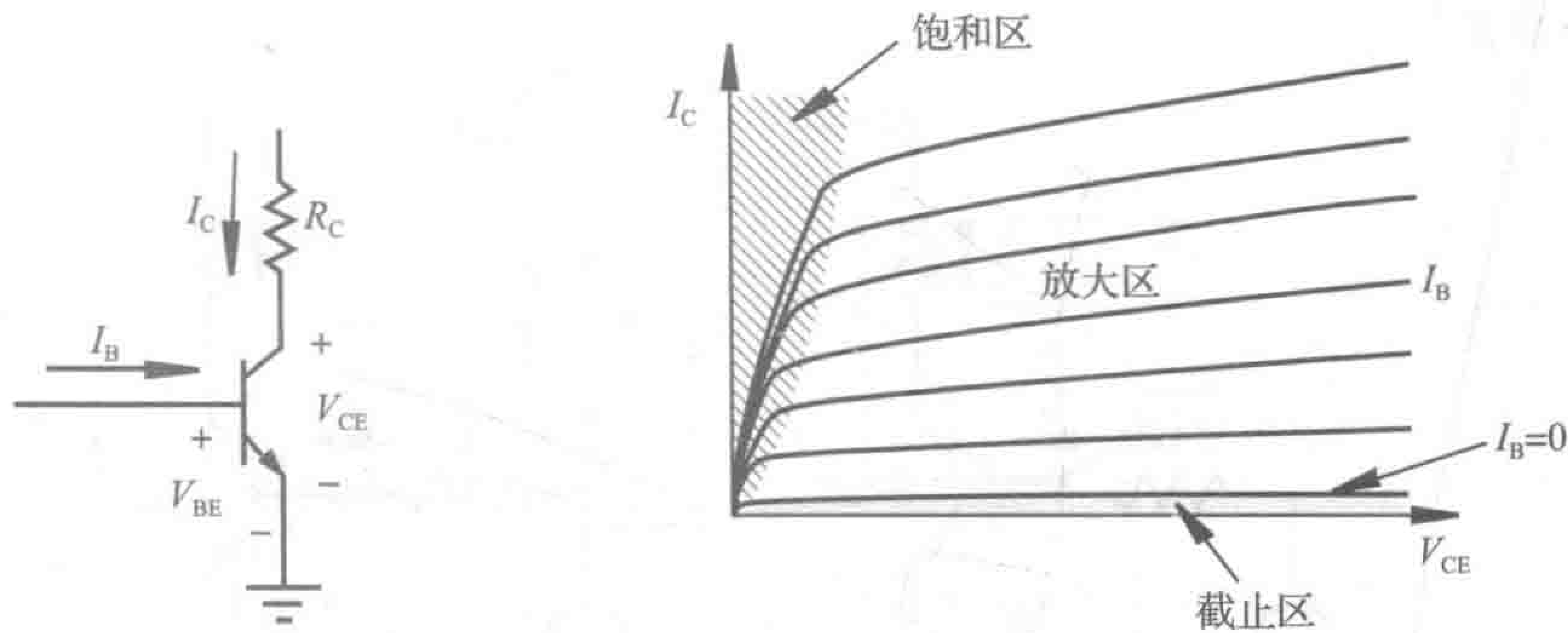


图 3-17 共射极电路

图 3-18 晶体管的共射极特性

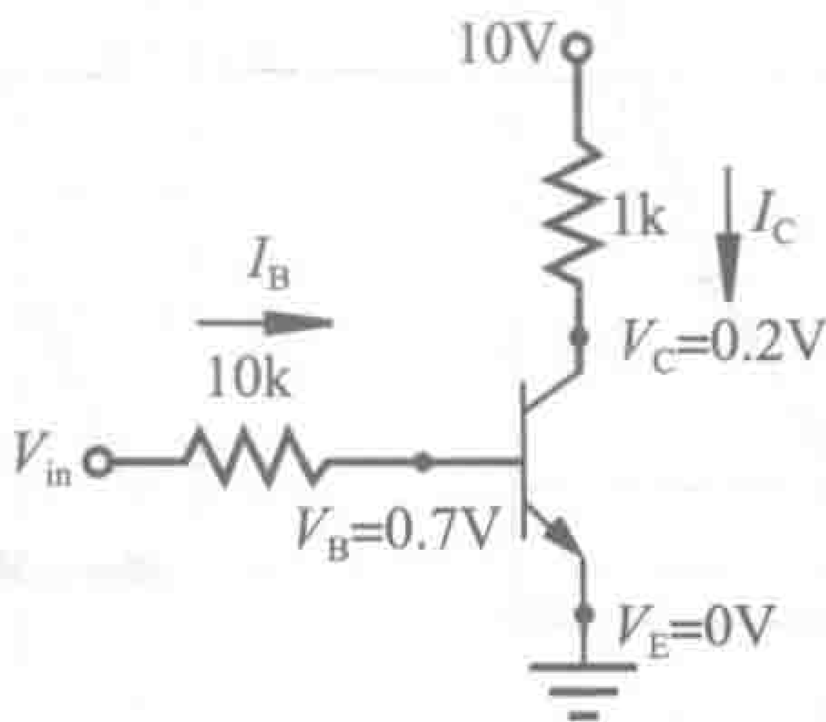
例 3.4 给出为了使晶体管饱和如何确定基极电流和输入电压的大小。对于给定的集电极电流，当其完全饱和时，晶体管消耗的功率($I_C V_{CE}$)最小。如果晶体管不完全饱和，它将很快发热并可能因此失效。

例 3.4 确保晶体管处于饱和状态

2N3904 是由许多公司制造的小信号晶体管，它可用作通用放大器和开关，在线或在晶体管数据手册中查看其规格可以找到其额定值和电气特性的完整列表。这里给出了部分信息：

- 最大集电极电流(连续)=200mA
- $V_{CE(sat)}=0.2V$
- $h_{FE}=\beta=100$(取决于集电极电流和许多其他因素)

在以下电路中，需要最小输入电压 V_{in} 为多少才能使晶体管饱和？



因为 2N3904 晶体管的 $V_{CE(sat)}$ 是 0.2V，所以当晶体管完全饱和时，集电极电流为：

$$I_C = (10V - 0.2V)/1k\Omega = 9.8mA$$

因为直流电流增益 h_{FE} 约为 100，所以 I_B 至少为 $I_C/100$ 或者 0.098mA。又因为 $V_{BE}=0.7V$，所以基极电流和输入电压的关系为：

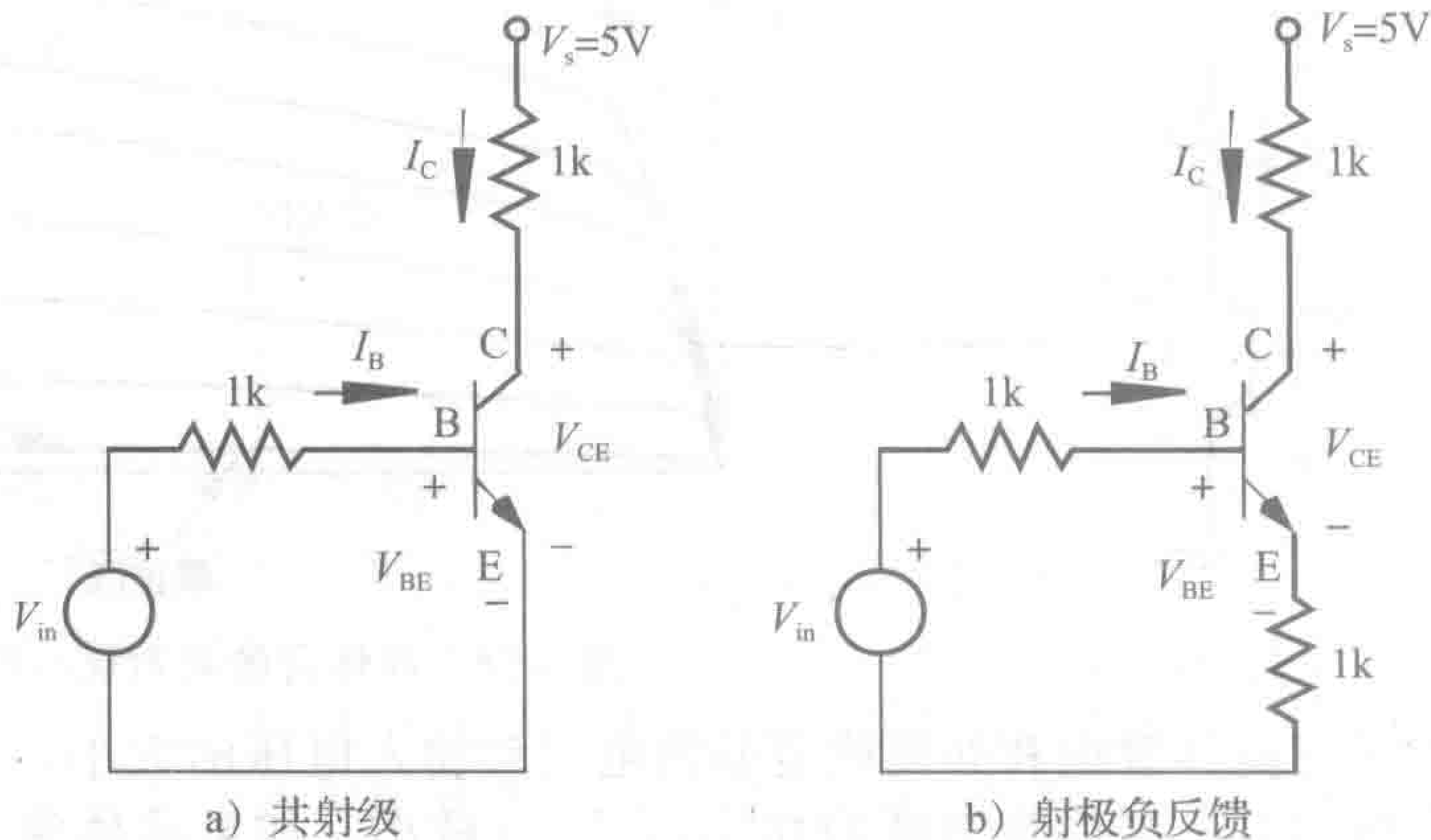
$$I_B = 0.098mA = (V_{in} - 0.7V)/10k\Omega$$

因此，满足饱和要求的最小输入电压为：

$$V_{in_{min}} = 0.98V + 0.7V = 1.68V$$

通常会使用比这个更大的电压值(2～5 倍)以确保晶体管即使在参数变化时也能完全饱和。

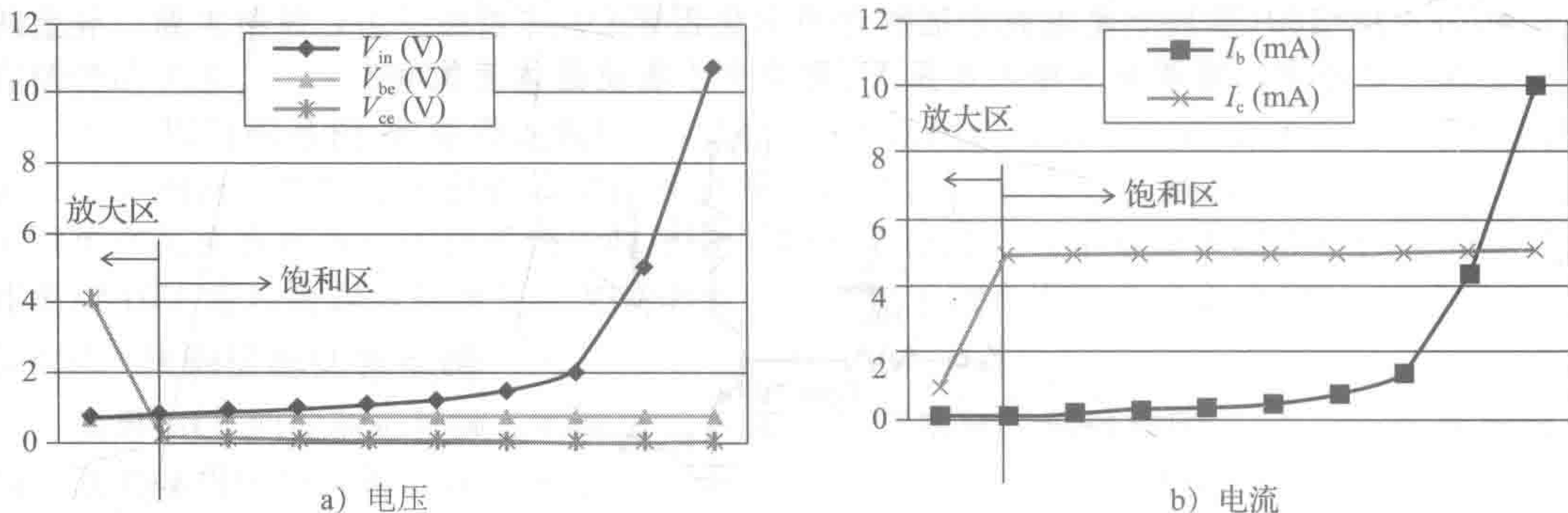
理解 BJT 功能的最好方法可能是在实际电路中测量电压和电流并绘制其结果，图 3-19 所示的两个电路是使用 2N3904 小信号晶体管进行测量的例子。实验练习 5 还包括一些经验，以帮助理解晶体管电路如何工作。第一个电路(见图 3-19a)是前文涉及的共射极电路结构。第二个电路(见图 3-19b)在发射极电路中增加了一个附加电阻，产生了所谓的发射极负反馈。



a) 共射级　　　b) 射极负反馈

图 3-19　晶体管实验

图 3-20 所示为共射极电路的测量结果(见图 3-19a)。注意，在图 3-20a 中，晶体管饱和后，即使输入电压 V_{in} 远高于饱和所需的最小电压值，基极-发射极正向偏置电压 V_{BE} 和集电极-发射极压降 V_{CE} 也变化不大。而由图 3-20b 可知，即使基极电流 I_B 高于饱和所需的电流，集电极电流 I_C 在饱和区也不会增加。如同例 3.4，为了使得晶体管处于完全饱和状态，确保足够大的基极电流是很重要的(针对可用的输入电压，选择合适的基极电阻)。尽管如此，当输入电压和基极电流明显高于饱和所需的最小值时，再增加输入电压和电流已经没有意义了，并且此时还会在基极-发射极电路中产生额外的热量和能量损失。



a) 电压　　　b) 电流

图 3-20　共射极实验结果

图 3-21 显示了发射极负反馈电路(见图 3-19b)的结果。在图 3-21a 中，注意，如同共射极电路一样，当晶体管达到饱和之后，即使输入电压 V_{in} 远高于饱和所需的最小值，基极-发射极正向偏置电压 V_{BE} 和集电极-发射极电压降 V_{CE} 也改变不大。但在图 3-21b 中，注意，集电极电流 I_C 的响应与共射极电路中的响应有很大的不同，如前所述，饱和和最大集电极电流只需要相当低的基极电流，然而，随着基极电流的增加，集电极电流下降，这种

效应称为**射极退化**。其原因是基极电流与集电极电流相加，引起发射极电流($I_E=I_B+I_C$)的增加，从而在发射极电阻上产生更大的压降(I_ER_E)，这降低了集电极电阻两端的电压差，导致集电极电流减小。随着发射极电压($V_E=I_ER_E$)接近集电极电源电压V_s，集电极电流实际上会减小到零，在集电极电阻上将没有电压差，也不会有集电极电流流过。对于应用在典型的机电开关中，共射极结构更为合适，因为其容易使晶体管饱和并在宽范围的电路参数上可以确保有最大的集电极电流。

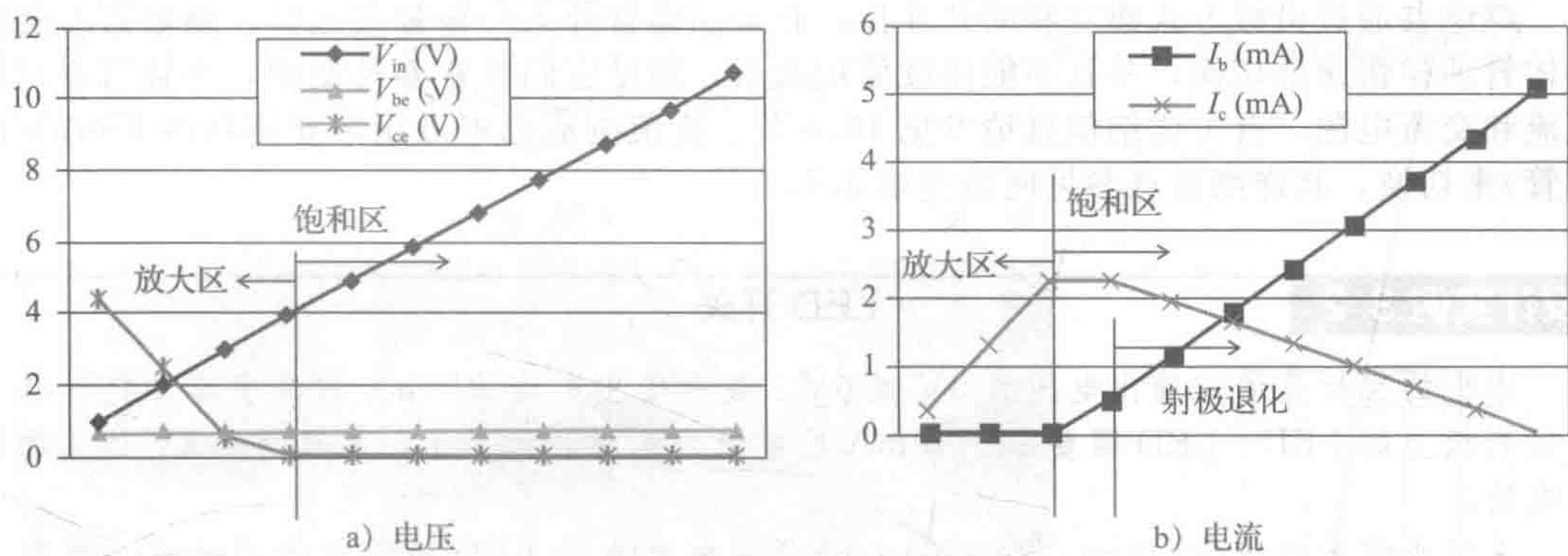


图 3-21 射极负反馈实验结果

3.4.3 双极型晶体管开关

图 3-22 给出了一个简单的晶体管开关电路。当V_{in}小于0.7V时，晶体管的BE结没有正向偏置($V_{BE}<0.7V$)，晶体管不导通($I_C=I_E=0$)。因此，可以假定集电极-发射极电路由非常高的阻抗或者开路来代替，如图3-23a所示，该状态称为晶体管的**截止**或断开状态。在截止状态下，输出电压V_{out}等于V_C，因为没有电流流过R_C且R_C上没有电压降。

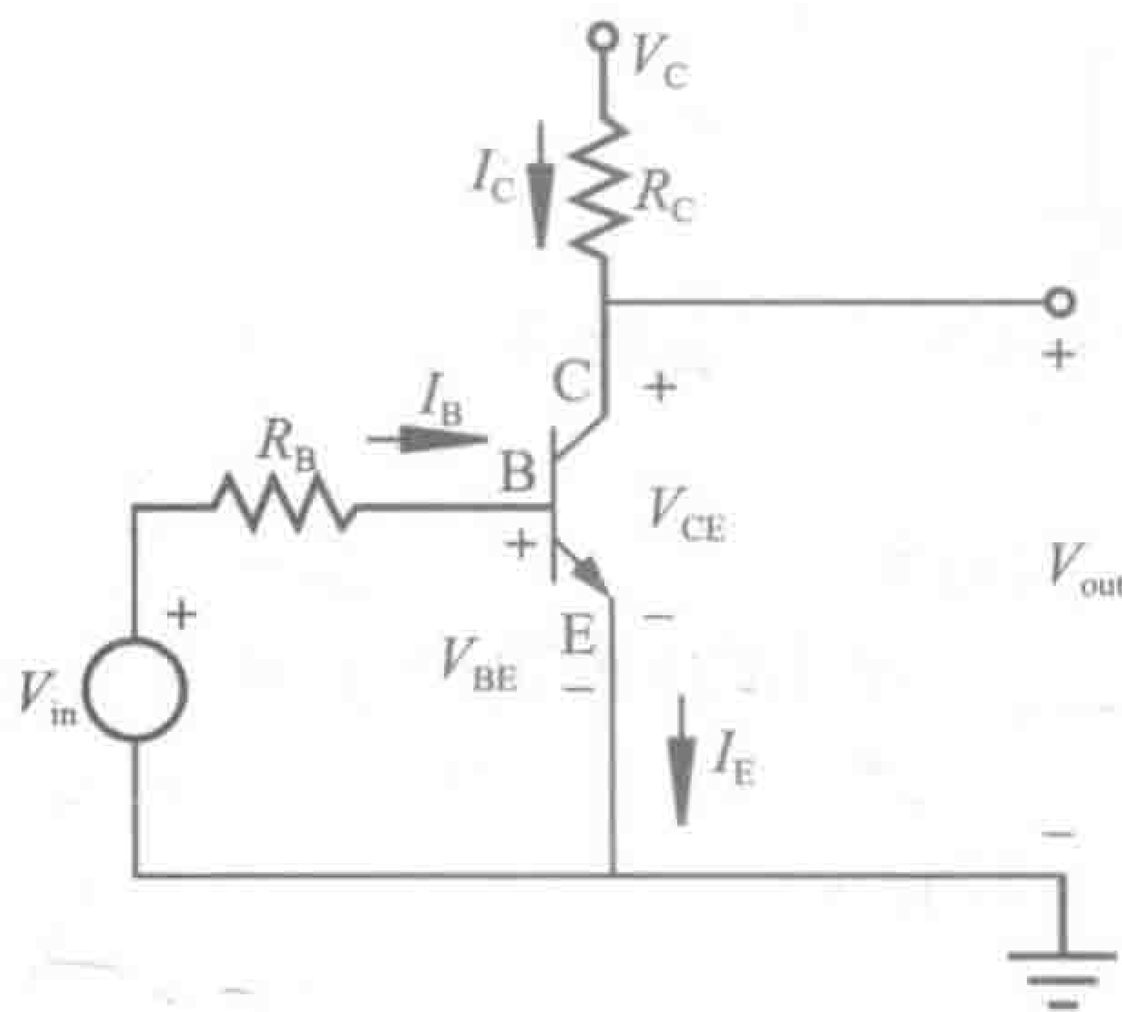


图 3-22 晶体管开关电路

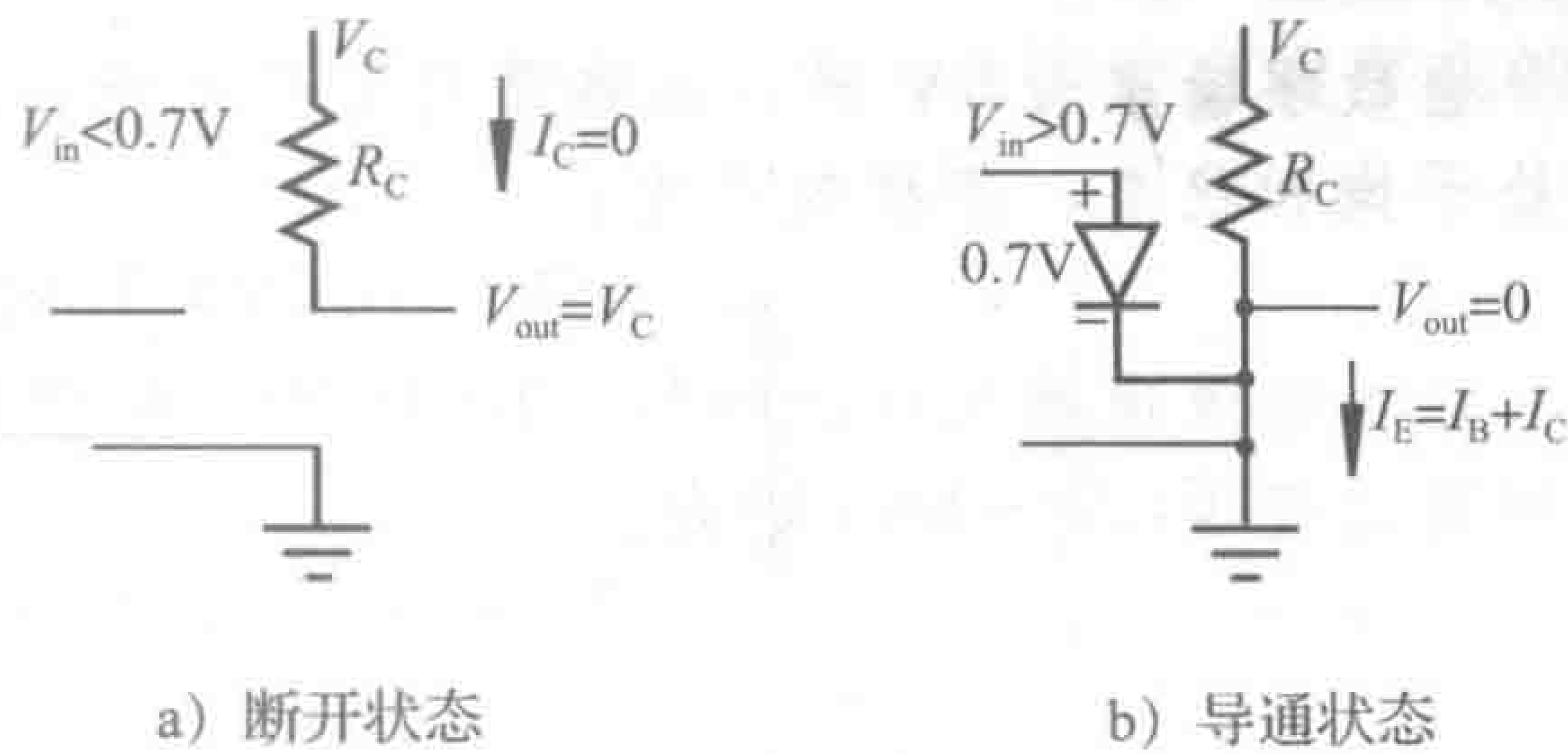


图 3-23 晶体管开关状态模型

当BE结正向偏置($V_{BE}=0.7V$)时，晶体管导通，电流通过CE电路，V_{out}接近地电位(饱和BJT的值为0.2V)。假设有足够的基极电流使晶体管饱和，则该状态可由图3-23b所示的正向偏置二极管来建模，称为晶体管的**饱和**或导通状态。在该电路中需要电阻R_B(见图3-22)来限制基极电流，因为BE结本质上类似于二极管。基极电流和R_B之间有如下关系：

$$I_B=(V_{in}-V_{BE})/R_B \tag{3-16}$$

当$V_{in}<0.7V$时，$I_B=0$和$V_{BE}=V_{in}$。

图3-22所示的电路可用作半导体开关，用于打开或关闭LED、电动机、电磁铁圈、电灯或其他一些负载(由图中的R_C来表示)。这些负载需要大电流才能正常工作，

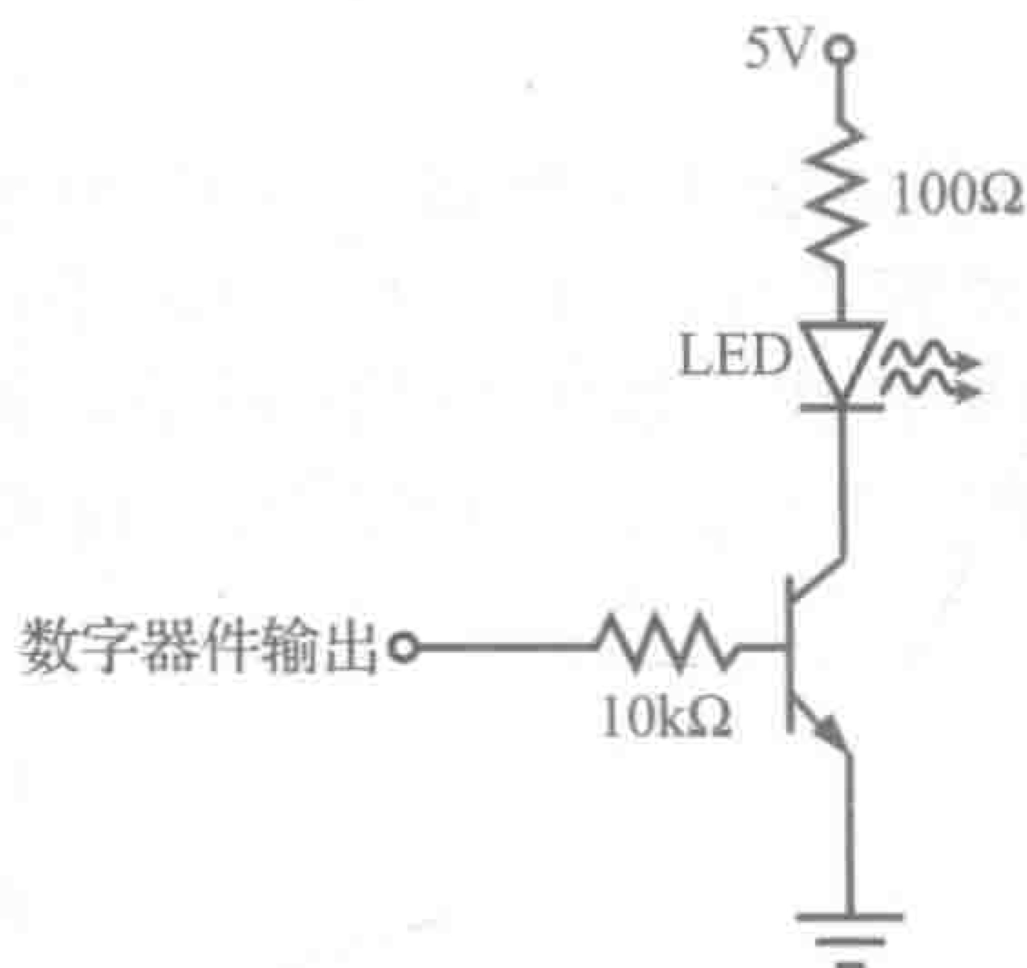
范围从毫安到安培量级。当输入电压和电流增加到足以使晶体管饱和时，大的集电极电流流过负载 R_C，集电极电流的大小由负载电阻 R_C 和集电极电压 V_C 来决定。当基极-发射极电压低于 0.7V 时，晶体管截止，没有电流流过负载。在功率电路中应用的晶体管称为**功率晶体管**，用于传导大电流并可耗散更多的热量。功率晶体管是基础器件，它可将低输出电流的元器件(例如集成电路和计算机端口)连接到需要大电流的其他器件上。

继电器通过机械方式建立和断开连接，它是晶体管开关一种替代选择。继电器不能像晶体管那样快速地切换，并且不能持续使用太久，但是它们非常容易使用，并且可以切换直流和交流电源。有关详细信息请参见 10.3 节。交流电流也可以用半导体器件 TRIAC(晶闸管)来切换，其详细信息参见网络链接 3.1。

设计实例 3.2　LED 开关

本例的目标是使用输出电压为 0V 或 5V，最大输出电流为 5mA 的数字器件打开或关闭仪表板上的 LED。LED 需要 20～40mA 的电流才能明亮地显示，并且需要 2V 的正向偏置电压。

采用小信号晶体管(例如，2N3904npn)开关电路来给 LED 提供足够的电流。所需电路如下：



当数字输出为 0V 时，晶体管处于截止状态，LED 熄灭。当数字输出为 5V 时，晶体管处于饱和状态，基极电流为：

$$(5\text{V} - 0.7\text{V})/10\text{k}\Omega = 0.43\text{mA}$$

这个电流值满足设计指标。100Ω 的集电极电阻会让流过 LED 的电流限制在 LED 亮度所需的范围(20～40mA)内：

$$(5\text{V} - 2\text{V} - 0.2\text{V})/100\Omega = 28\text{mA}$$

实验练习 5 演示了如何连接和使用各种类型的二极管和晶体管电路。包括基本晶体管开关电路、具有续流保护的电机驱动电路(见视频演示 3.2)和光遮断器。

总结一下设计晶体管开关的指南。导通时，基极-发射极电压(V_{BE})必须为 0.7V，只要有足够的基极电流确保晶体管饱和，集电极电流 I_C 将独立于基极电流 I_B。可以通过首先确定集电极电流 I_C，然后应用 $I_{B_{min}} \approx I_C/\beta$ 来估计所需的最小基极电流。对于给定的输入电压，必须选择合适的输入电阻使得基极电流超过该值一个保守裕度(例如，大 5～10 倍)。这样做的原因是 β 可能随所用的元器件、温度和电压而变化，并且负载电阻可能随着流过的电流而改变。计算 I_C 和 I_B 的最大值以确保它们在制造商给定的指标内，如果电流太大，可以增加或更改串联电阻。

3.4.4 双极型晶体管的封装

图 3-24 给出了制造商提供的晶体管的多种封装类型，其中，小信号晶体管通常采用 TO-92 封装，而功率晶体管采用 TO-220 封装。表面安装技术越来越普遍地用于印制电路板产品中，但是这类器件由于尺寸小，不太适用于原型板设计。图 3-25 和视频演示 3.3 说明了各种常见的晶体管封装，包括 BJT、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET，在 3.5 节中讨论)和光遮断器(在 3.4.6 节中讨论)。

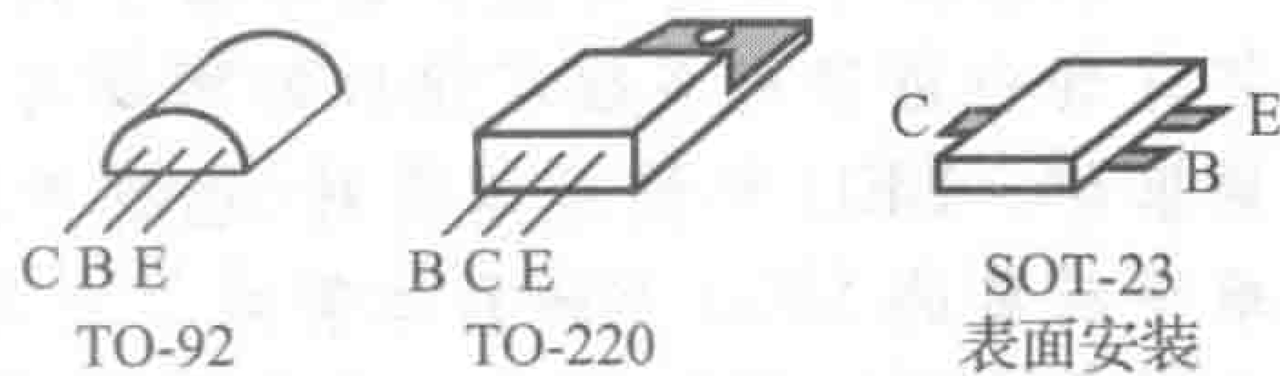


图 3-24　双极型晶体管的封装

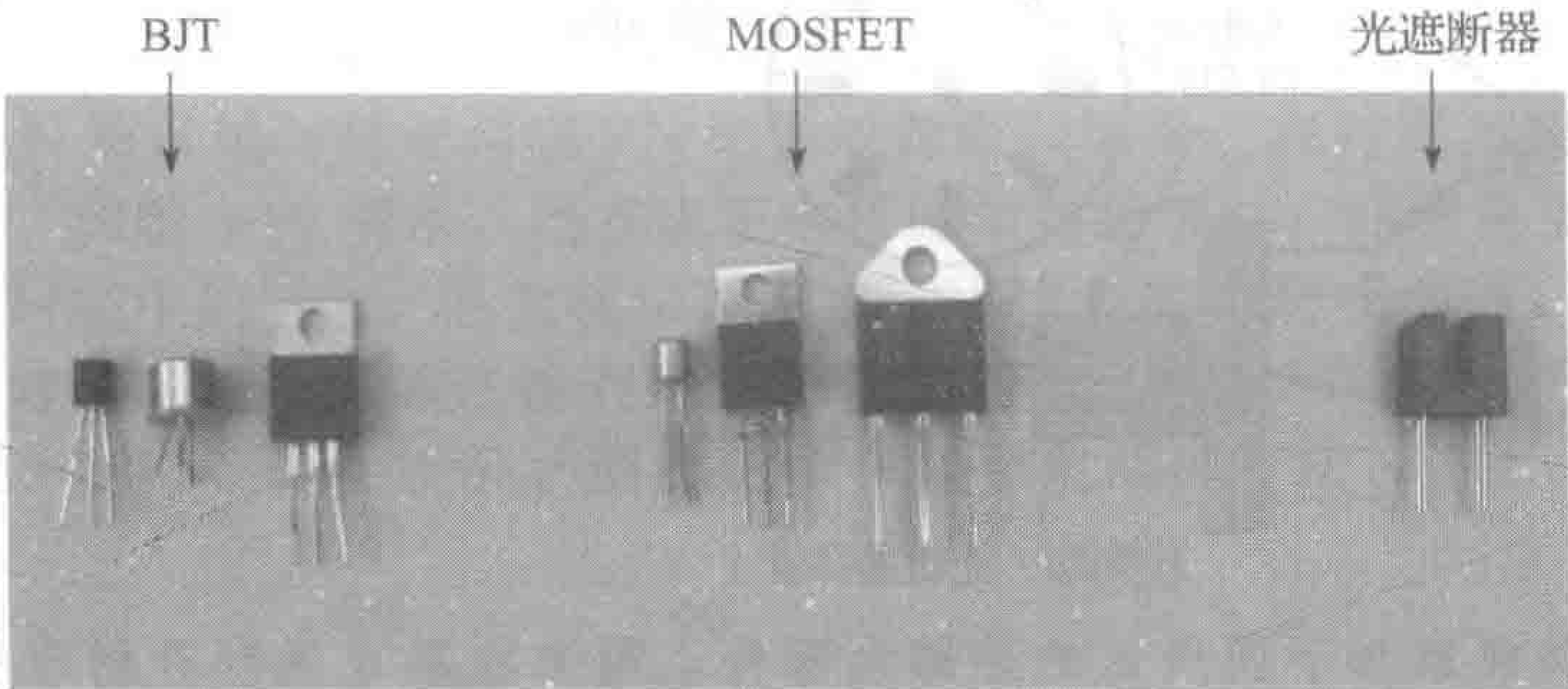


图 3-25　各种常见晶体管的封装

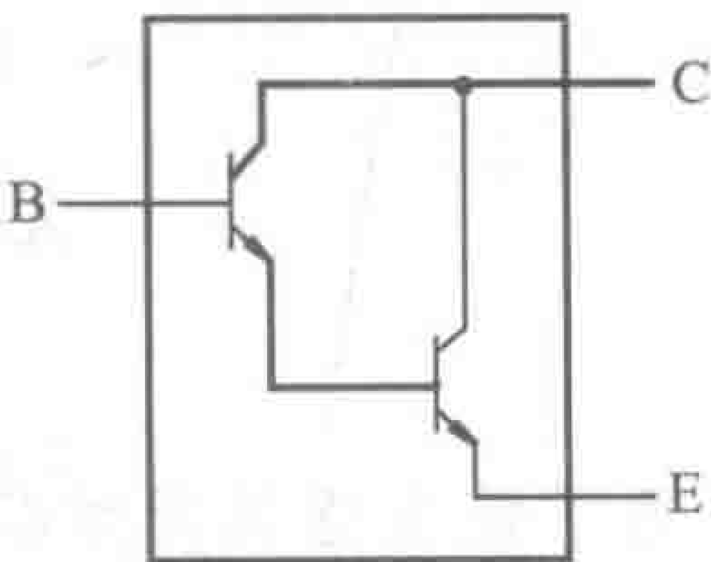


图 3-26　达林顿晶体管对

3.4.5 达林顿晶体管

图 3-26 所示的原理图显示了一个名为**达林顿对**的晶体管，它通常是单个封装。这种组合的优点是电流增益是两个单独晶体管增益的乘积，其值可以超过 10 000。它们通常用于机电一体化系统的功率电路中。

3.4.6 光敏晶体管和光隔离器

光敏晶体管是一种特殊类型的晶体管，其基极和发射极之间的 PN 结类似于光敏二极管(见 3.3.3 节)。LED 和光敏晶体管通常成对出现，其中 LED 用于产生光，然后该光又给光敏晶体管带来偏置。LED 和光敏晶体管对可以用于检测 LED 和晶体管之间存在的物体，因为它会部分或完全阻碍光束(参见实验练习 5)。

光隔离器由 LED 和光敏晶体管组成，并由一个小间隙隔开，如图 3-27 所示。LED 发射的光可以使光敏晶体管电路中产生电流，其输出电路可以有与输入不同的参考地，并且可以选择电源电压 V_s 用来建立期望的输出电压范围。由于没有公共地，光隔离器通过光传输信号而不是通过电连接，这使得输入和输出电路之间实现了电气隔离。隔离的好处是可以保护输出电路，避免过大的输入电压导致输出电路中的元器件损坏。此外，由于电源和接地是分开的，因此输出电路中可能出现的任何波动或干扰对输入侧的控制信号都没有影响。

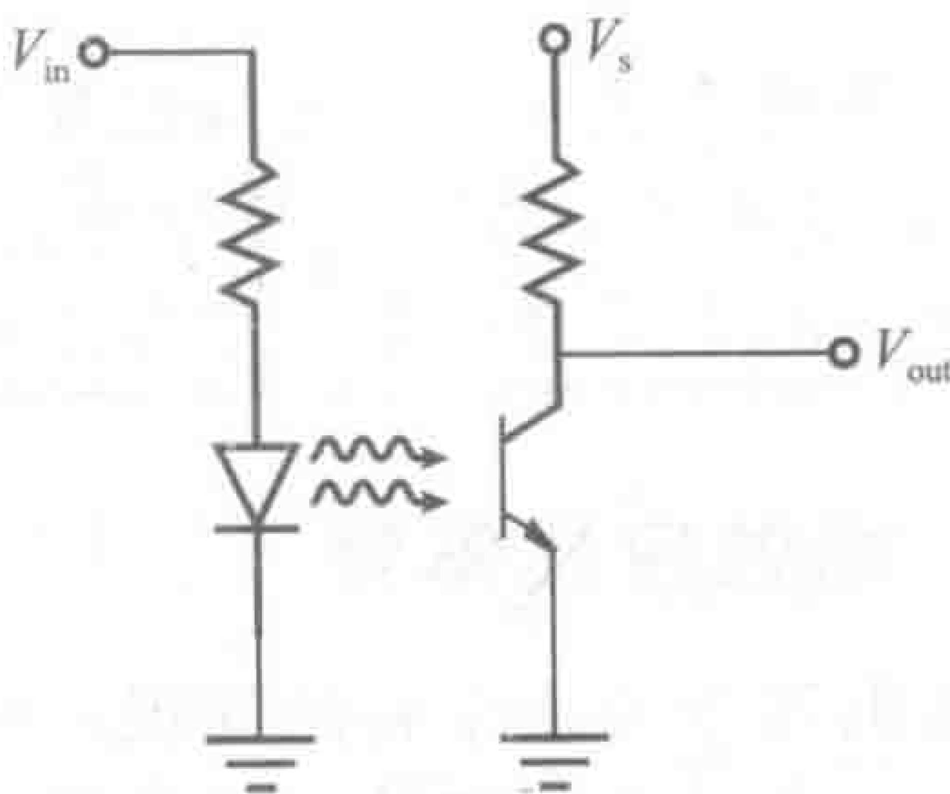


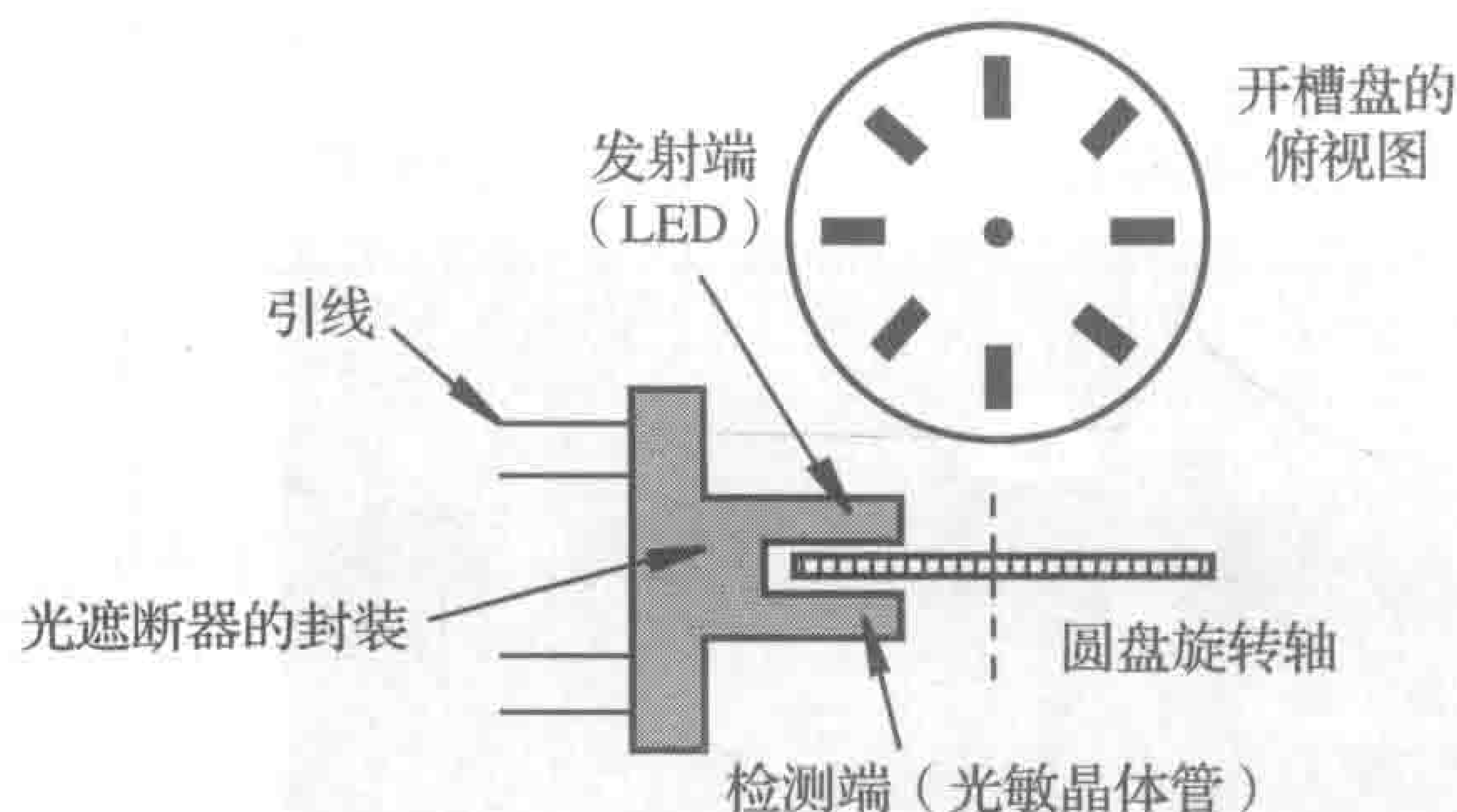
图 3-27　光隔离器

设计实例 3.3　机器人扫描器的角位置

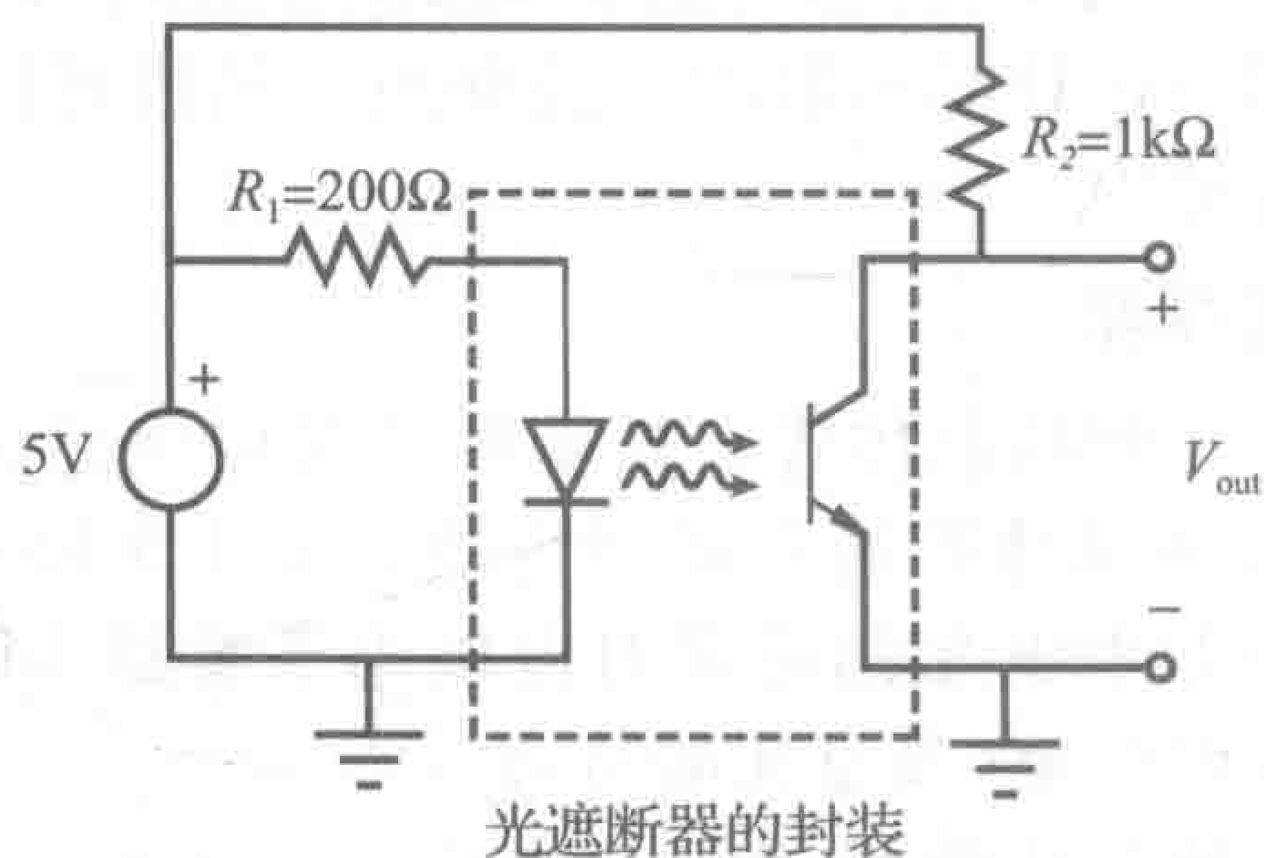
该设计实例给出了半导体光电元器件的应用。假设在自主机器人的直流设计中，希望有一个激光扫描设备来扫描环境用来检测障碍物。扫描器的头部通过直流电动机控制，可

以旋转 360°。这里的问题是跟踪扫描头的角位置。如果想让机载计算机使用检测值，该怎么做？

该解决方案需要提供数字输出的传感器，即其输出可以由数字计算机来处理。第 6 章将详细介绍了更多数字接口的相关内容。为了简化解决方案，选择一个产生 5V 数字输出的器件。LED 光敏晶体管对(也称为**光遮断器**)是设计的核心，如下图所示。很容易找到单个封装的 LED 光敏晶体管对，它可以产生光束并可以遮断光束。开槽盘必须设计成能够安装到驱动扫描头的电动机轴上并且穿过光遮断器对中的间隙，圆盘上的每个开槽在旋转期间允许光束通过，从而提供数字脉冲。



为了使传感器正常工作，必须添加下图所示的外部元器件，用来在每次遇到开槽时提供数字脉冲。LED 发射器及其限流电阻 R_1 由 5V 直流电源供电，光敏晶体管检测器和外部电阻器 R_2 提供输出信号 V_{out}。R_2 称为**上拉电阻**，因为当晶体管处于截止状态时，它将输出的电压(V_{out})从地(0V)上拉到 5V。当晶体管饱和时，输出电压接近 0V。



光遮断器的封装

当开槽盘旋转时，光通过每个槽产生 0V 输出，当两开槽之间的圆盘遮断光束时，输出 5V，结果就形成了一串脉冲。产生的脉冲数是旋转角度的一种数字近似。例如，如果圆盘有 360 个开槽，则每个脉冲将对应 1°的旋转角度。

3.5 场效应晶体管

根据迄今为止学到的知识，可以使用 BJT 和其他分立元器件设计机电一体化系统中的电路了。本节介绍**场效应晶体管**(FET)，其操作原理不同于 BJT，但在机电一体化系统的设计中发挥类似的作用。如同将在第 6 章中看到的一样，它也是数字集成电路设计中的重要器件。

BJT 和 FET 都是三端器件，这使得我们可以在功能和如何在电路中使用两个方面进行类比。在介绍 FET 工作原理的细节之前，先给出其一般特性。BJT 和 FET 都通过施加到第三个端子上的电压控制其余两个端子之间的电流来工作。在 3.4 节中，BJT 的基极-发射极 PN 结的正向偏置允许带电载流子从发射极进入薄的基极区，在那里它们被吸引到集电极，使得很小的基极电流可以控制很大的集电极电流，因而得出结论，BJT 是一个电

流放大器。与此相反，对于FET，一个电极上的电压产生的电场控制着一个名为沟道的狭窄区域中带电载流子的可用性，通过该沟道电流可以流动。因此，可以将FET描述为跨导放大器，即输出电流由输入电压控制。

用于描述FET的术语如下，FET的控制电极(称为**栅极**)类似于BJT的基极。与BJT基极相反，FET的栅极无直流电流(DC)流过，因为它与所连接的衬底绝缘。栅极控制着导电沟道的导电性，导电沟道位于**漏极**(类似于BJT中的集电极)和**源极**(类似于BJT中的发射极)之间。有3种FET：增强型**金属氧化物半导体FET**(MOSFET)、耗尽型MOSFET和**结型场效应晶体管**(JFET)，每个系列都可分为P沟道和N沟道。初次接触不同系列和种类的FET时，理解其原理稍显复杂，所以此处，仅关注使用广泛的N沟道增强型MOSFET，可以发现其功能与NPN型BJT类似。

N沟道增强型MOSFET的截面图和原理图如图3-28所示，它以P型硅片为衬底，两个N型区域与衬底构成PN结形成源极和漏极。在衬底上制作薄的二氧化硅绝缘层作为栅极。如图3-29所示，当直流正电压施加到栅极时，在栅极下方的衬底中形成的电场排斥P型衬底中的空穴，在衬底中留下电子占优势的窄层或**沟道**，这在P型衬底中称为**N沟道**。通常衬底通过内部连接到源极，使得衬底-源极PN结不正向偏置。在电路图符号中(见图3-28b)，箭头表示P型衬底和N沟道之间的方向。

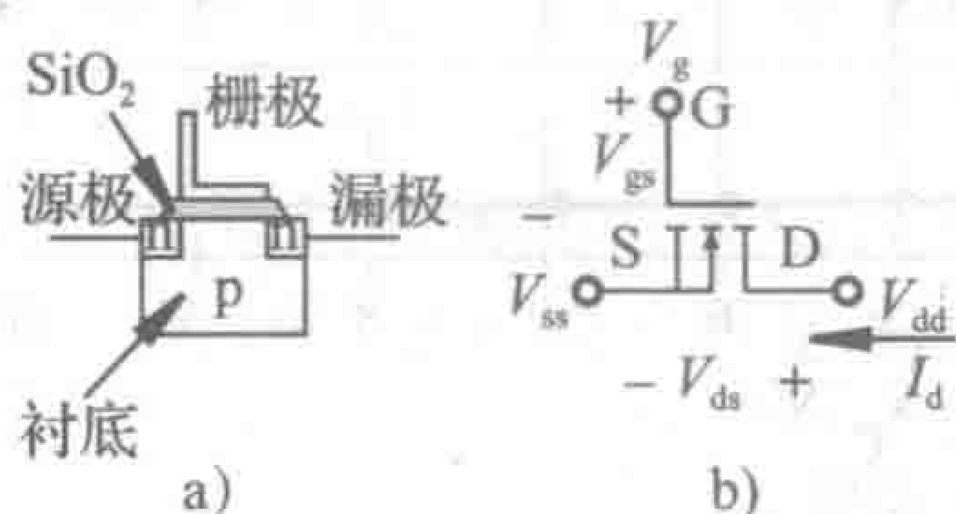


图3-28 N沟道增强型MOSFET

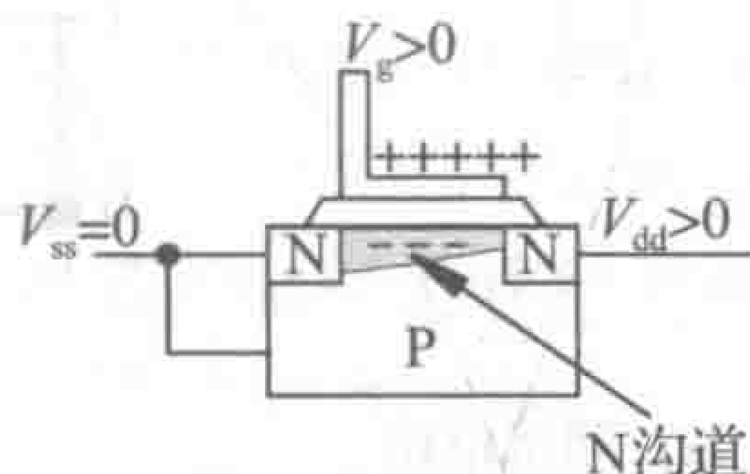


图3-29 增强型MOSFET的N沟道形成

3.5.1 场效应晶体管的特性

以N沟道增强型MOSFET为例，本节详细解释其工作原理，并讨论类似于BJT的特性曲线。如果栅极接地($V_g=0$)，因为漏极PN结反向偏置无法形成导电沟道，即使施加正的漏极电压V_{dd}，也不会有漏极源极电流I_d。在这种状态下，MOSFET相当于一个非常大的电阻(大约为$10^8 \sim 10^{12}\Omega$)，漏极和源极之间没有电流流过，MOSFET处于**截止状态**。

随着V_{gs}逐渐增加至超过栅极至源极的**阈值电压**V_t，N沟道开始形成。V_t取决于特定的MOSFET，其典型值约为2V。然后，V_{ds}从零开始增加，使源极到漏极的电子流动，N沟道导电。漏极电流I_d与电子流方向相反。由图3-29可以看出，源极附近的N沟道比漏极附近的N沟道更宽，这是因为源极处的V_g和地之差大于漏极处的V_g和V_{dd}之差。

当V_{gs}大于V_t时，随着V_{ds}从零开始增加，进入MOSFET的**有源区**，也称为**欧姆区**。在该区域，随着V_{gs}进一步增加，导电沟道相应地增长，MOSFET看起来类似于一个由V_{gs}控制的可变电阻。然而，当$V_{gs}-V_t$达到V_{dd}时，在MOSFET的漏极端不再有电场。因此，N沟道的宽度收缩到接近漏极的最小值，导致了所谓的**夹断**。这种夹断限制了漏极电流的进一步增加，此时MOSFET处于**饱和状态**。饱和时，随着V_{ds}的进一步增加，电流几乎恒定。进入饱和区后，漏极-源极电阻R_{on}最小(通常小于5Ω)。

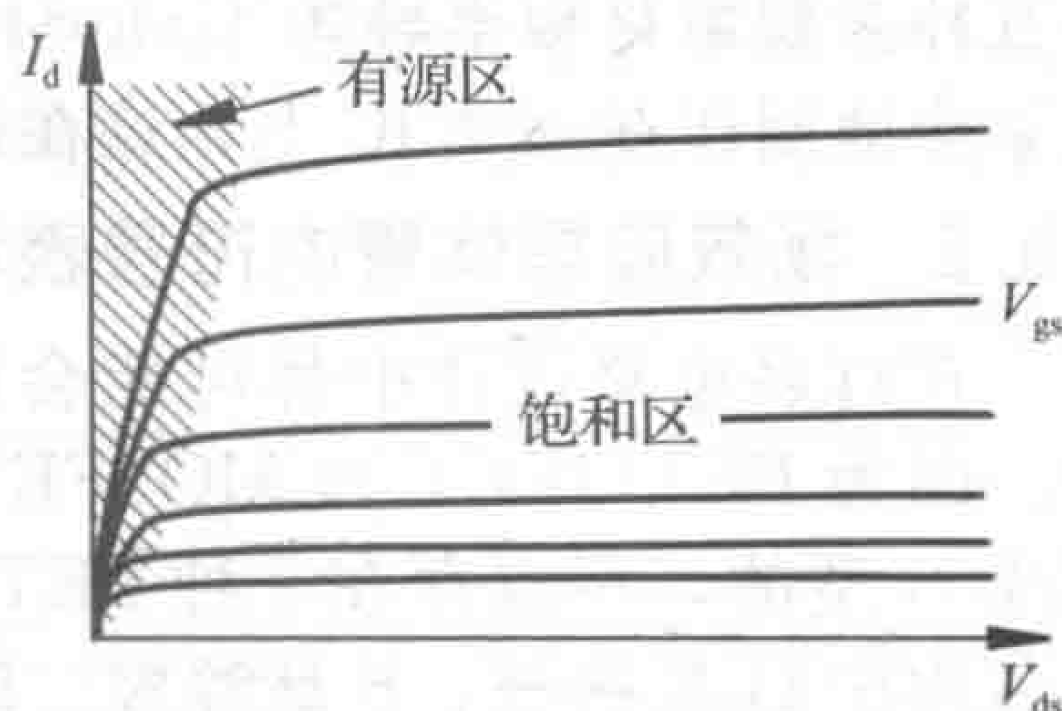
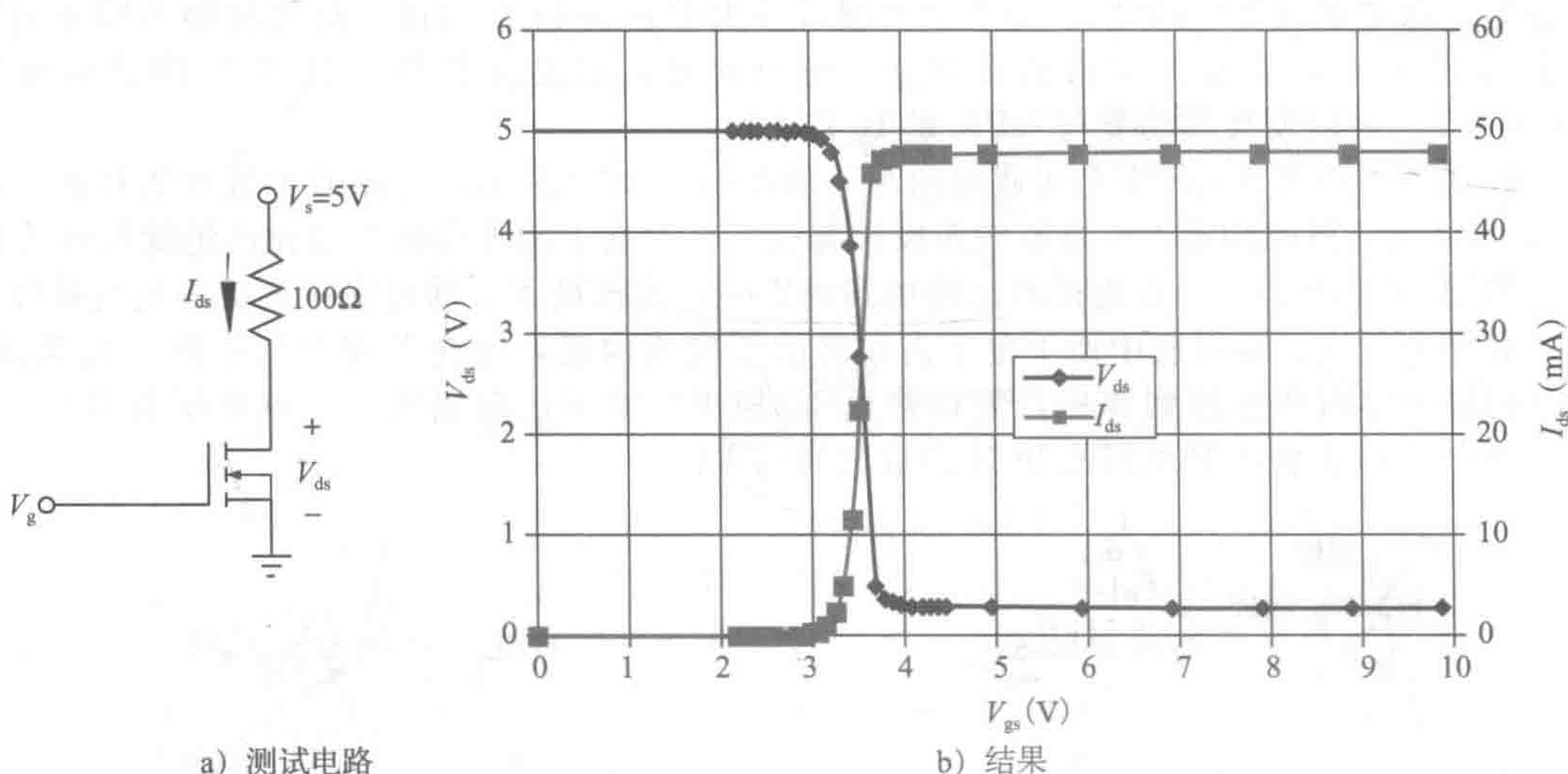


图3-30 N沟道增强型MOSFET的特性曲线

图3-30显示了N沟道增强型MOSFET的特性曲线族，通过图形描述了上述特性。类似于图3-18所示的NPN BJT曲线。通过比较特性曲线可见，MOSFET的饱和区域对应于BJT的放大区域，因此在使用这些术语时必须小心。

与分析 NPN BJT 类似，采用 IRF620 功率 MOSFET 进行实际 MOSFET 电路电压和电流的测量，电路如图 3-31a 所示。实验中，栅极电压 V_g（即栅极到源极电压 V_{gs}，因为源极接地）从 0 逐渐增加至 10V，在感兴趣的区域内，其增速可以更慢。图 3-31b 显示了漏极到源极的电流 I_{ds} 和漏极到源极的电压 V_{ds} 的测量结果。从图中可以看出该 MOSFET 开始导通（$I_{ds}>0$）时的阈值电压约为 3.5V。此外，还可看出，当 MOSFET 完全导通时，漏极-源极电压 V_{ds} 不会下降到零。这是由于器件的漏极到源极电阻 R_{on}（见问题 3.22）产生了小的压降（$V_{ds}=I_{ds}R_{on}$）。



a）测试电路　　b）结果

图 3-31　MOSFET 实验

P 沟道增强型 MOSFET 的横截面和原理图如图 3-32 所示。与 N 沟道 MOSFET 一样，箭头指示衬底-沟道 PN 结的方向。如果栅极相对于源极（$V_{sg}>0$）为负，则 N 型衬底中的电子被排斥，在栅极下方形成 P 沟道导电层，如果 V_{sd} 为正，则允许电流从源极流到漏极。P 沟道增强型 MOSFET 的功能类似于 PNP BJT。

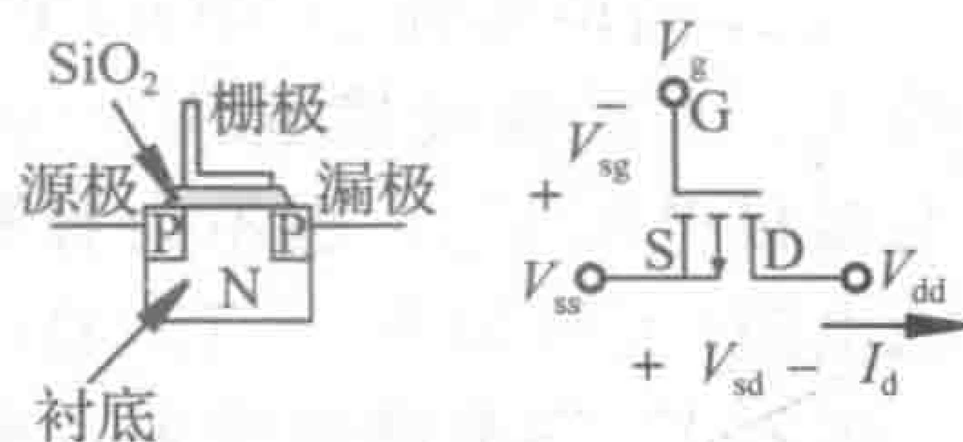


图 3-32　P 沟道增强型 MOSFET

MOSFET 在各种机电一体化系统中应用非常广泛，如 MOSFET 可用于制造性能优越的大电流压控开关。此外，一些 MOSFET 专门设计为模拟开关，实现电路信号的接通或阻断功能，这些例子在 3.5.3 节中给出。MOSFET 也用在驱动直流电动机的专用电路中，由于 MOSFET 在饱和区有平坦的特性曲线，所以它也可用作电流源。在微处理器等集成电路（IC）的内部设计中，MOSFET 也同样有用，IC 中的 MOSFET 通常以互补对的形式（N 沟道和 P 沟道）出现，所得到的 IC 称为**互补金属氧化物半导体**（CMOS）器件。由于 N 沟道和 P 沟道晶体管的对称性，使得它们可以紧凑地制作在一个 IC 上，这在逻辑器件的内部设计中非常有用（将在第 6 章中说明）。

3.5.2　场效应晶体管的符号表示

在许多电路设计中都可能会遇到 FET，所以区别其原理图符号的细微之处是很重要的。因为 FET（JFET 和 MOSFET）具有两种不同类型的沟道掺杂，并且因为衬底可以是 P 型或 N 型的，所以存在 8 种 FET 结构。4 个最重要的 FET 类型的符号如图 3-33 所示。端子名称中 G 是栅极、S 是源极、D 是漏极、B 是衬底。原理图的一些主要特性包括：

1. 栅极或衬底中箭头的方向在 P 沟道（箭头向外）和 N 沟道（箭头向内）中不同。

2. 与 JFET 不同，MOSFET 的栅极和源极之间是隔开的。隔开代表 MOSFET 中的金属氧化物绝缘层。

3. 源极和漏极之间的虚线表示增强型器件，与耗尽型器件的实线相反。增强型 FET

需要在栅极上施加电压用于导通，而耗尽型 FET 需要栅极电压降低其导通性。JFET 仅有耗尽型，但 MOSFET 包括两种类型。

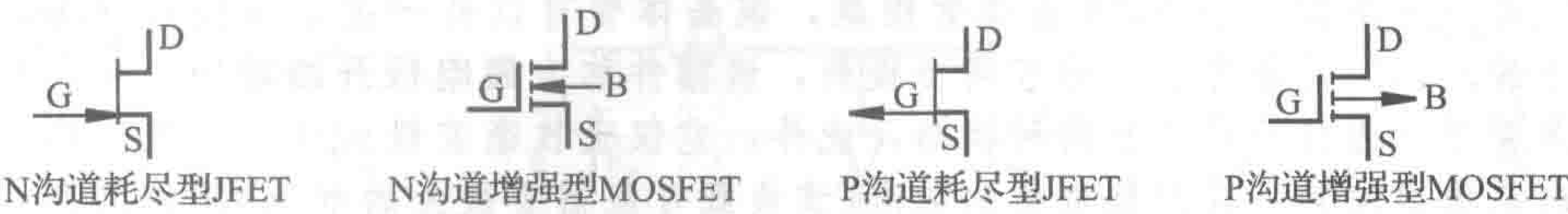


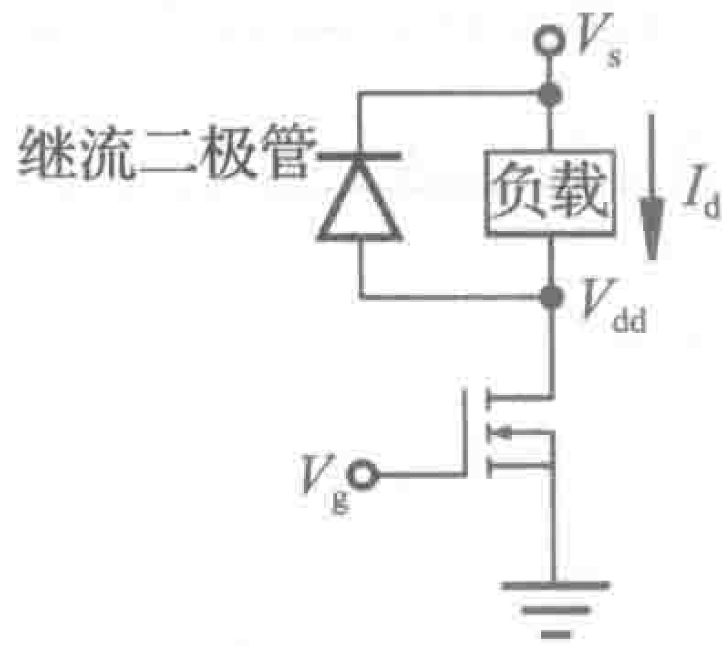
图 3-33 场效应晶体管的原理图符号

4. 栅极线朝向源极偏移，因此可以容易地区分源极。但有时栅极线位于中间，这样会无法区分源极和漏极，除非在图中加以标记。

MOSFET 的衬底可以连接到单独的端子上或内部连接到源极上。如果存在单独的衬底引线，则对 N 沟道器件来说，其不必偏置比源极或漏极更正的电压；对 P 沟道来说，不能偏置比源极或漏极更负的电压。衬底应当连接到电路某处(即它不应被“悬空”)。

3.5.3 MOSFET 的应用

首先考虑 MOSFET 应用的是电源负载开关。此电路类似于 3.4.3 节中提到的 BJT 开关。如图 3-34 所示，负载与 N 沟道增强型功率 MOSFET 的漏极相连。注意，因为栅极实际上不需要提供稳态电流，所以这种 MOSFET 开关非常容易设计。必须确保 $V_g \leqslant 0$，使得 MOSFET 处于截止状态，此时负载上应没有电流流过。当 $V_g - V_t \approx V_{dd}$时，MOSFET 进入饱和状态，此时负载两端的电压几乎达到最大值 V_s(因为 R_{on}很小)。MOSFET 的控制参数是栅极电压 V_g，而 BJT 的控制参数是基极电流 I_B。使用 BJT 时，必须确保足够的基极电流使 BJT 饱和。使用 MOSFET 时，栅极电流本质上为零，所以不需要在意电流源问题。尽管如此，需要计算 MOSFET 的漏极电流 I_d和功耗，以选择能够驱动负载的期望电流。此外，与 BJT 一样，如果负载为感性，则需要使用续流二极管(见图 3-34)，以防止在断开时损坏 MOSFET。



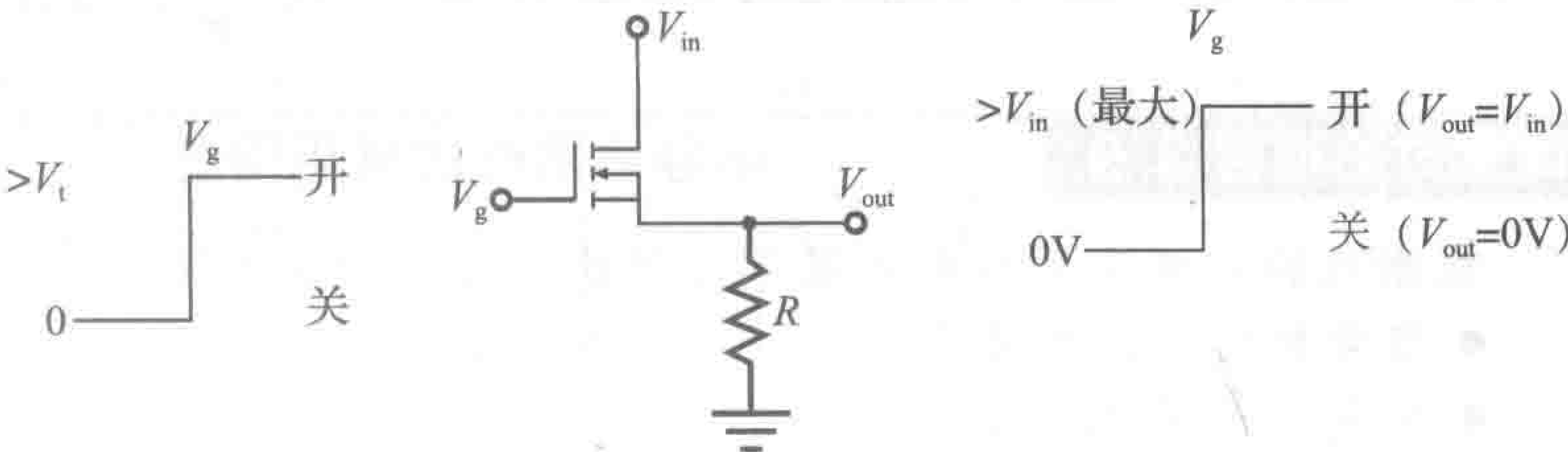


图 3-34 MOSFET 电源切换电路

图 3-35 MOSFET 模拟开关电路

MOSFET 的第二个应用是模拟开关。假设想将一个正的模拟信号 V_{in}耦合到另一个电路或元器件上，或完全阻止其耦合，这可以很容易地通过图 3-35 所示的电路实现。如果控制信号 V_g为零，则 MOSFET 截止，导致漏极和源极之间有一个很大的阻抗(兆欧级别)，这基本上阻断了模拟电压($V_{out}=0V$)，图中使用下拉电阻 R 将截止状态下的 V_{out}维持在地电平。当控制信号 V_g大于最大模拟输入信号 V_{in}与阈值电压 V_t之和时，漏极到源极的沟道将以低电阻形式导通，输出信号跟随输入信号($V_{out}=V_{in}$)。

课堂讨论项目 3.8　模拟开关的局限

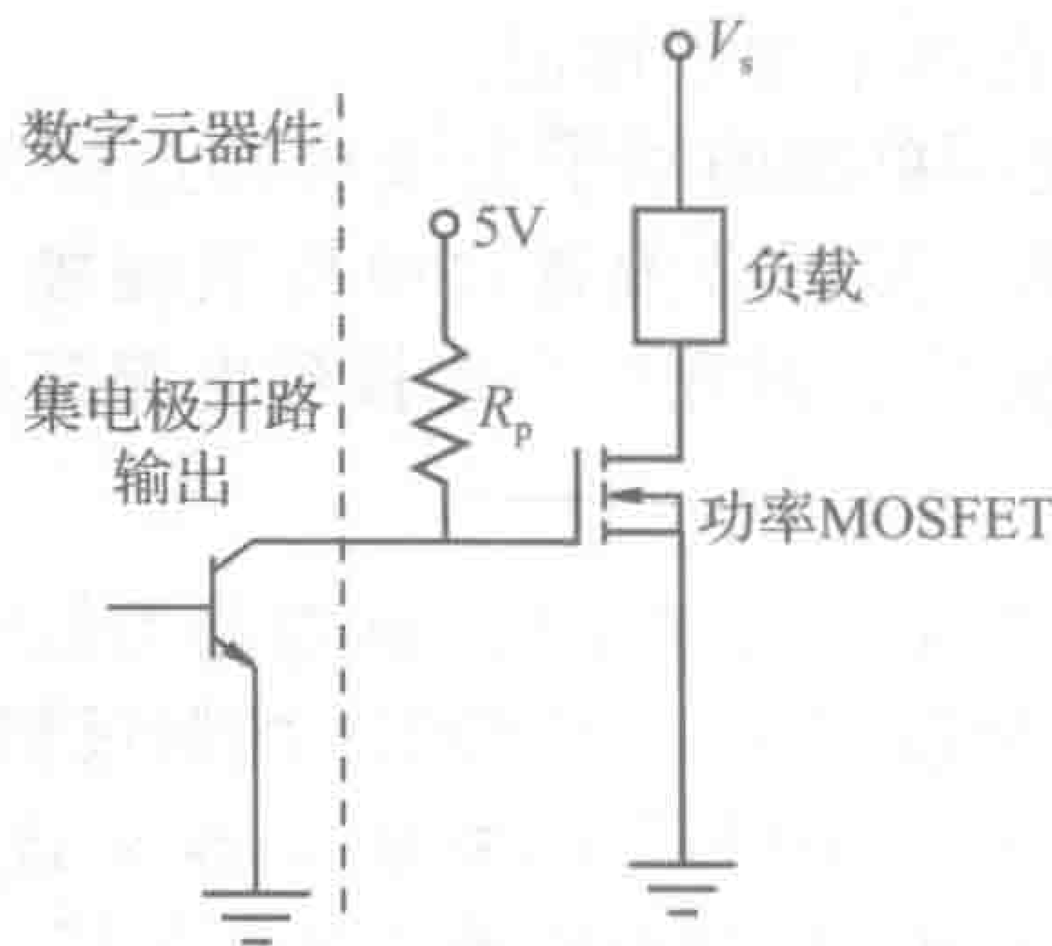
在图 3-35 所示的模拟开关电路中，为什么要求栅极控制信号大于模拟信号的最大值?

设计实例 3.4　电源开关电路

在机电一体化系统设计中，一个常见问题是为系统的不同部分分配电源。MOSFET

是完成此项任务的有用器件。

假设已有一个能够产生二进制输出的数字设备，即输出是 0 和 1 两种状态之一。此外，假设输出电路由一个 NPN 晶体管组成，该晶体管可以处于截止或饱和状态，但集电极还未连接到任何元器件上，后文将会提到，该器件称为**集电极开路输出**。现在只需了解输出晶体管可以为打开或关断两种状态，此外，它仅吸收毫安级的微小电流。那么如何连接该二进制输出使其可以控制负载的电流(该负载可能需要很大的电流)? 该问题的一个解决方案是使用下图所示的 N 沟道增强型 MOSFET 功率晶体管电路。图中虚线的左侧是数字设备的输出电路，需要设计的部分在右侧。



将电阻 R_p 连接到集电极引线，使得数字输出电路完整。因为 R_p 将集电极电压“拉升”为直流电源(5V)，所以 R_p 称为**上拉电阻**。当输出晶体管导通时，MOSFET 栅极端电压是 0V；当输出晶体管截止时，栅极端电压为 5V。由于负载电流大于数字输出所能提供的电流，所以为了驱动大电流负载，这里使用功率 MOSFET 来开关不同的电源 V_s。

现在，如果给出负载(如电动机)的特定电流和电压要求，即可以参考制造商或供应商提供的数据来选择合适的 MOSFET 完成这项工作。

课堂讨论项目 3.9　半导体器件的常用用途

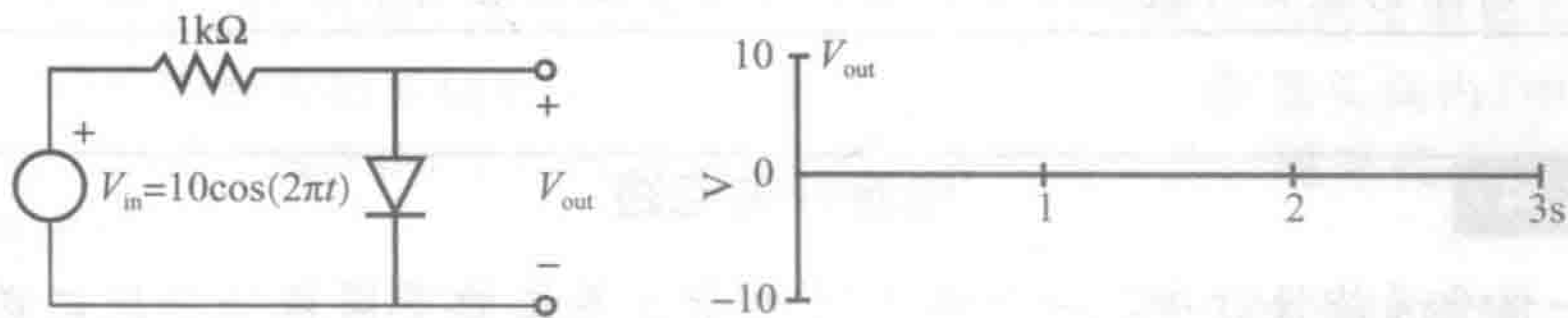
根据经验，说出下列电气器件在何处使用和如何使用：

- 信号和功率二极管
- 发光二极管
- 信号和功率晶体管

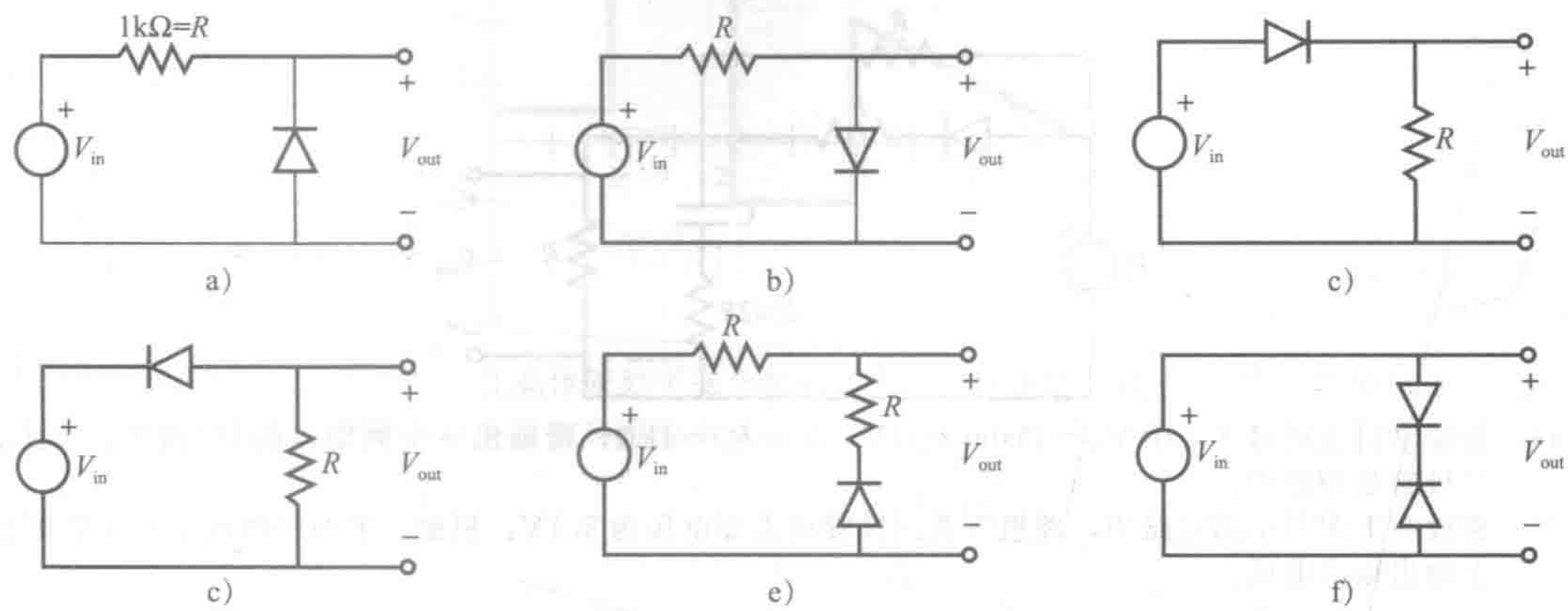
网络链接 2.4 提供了电子元器件的各种资源和供应商的链接，包括本书中给出的所有元器件。电子供应商提供了大量的在线信息，以便轻松查找数据和订购。网络链接 3.2 提供了最大的半导体器件制造商的链接。半导体制造商为各种集成电路提供了大量有用的在线信息。网络链接 3.3 是一个很好的资源，提供了对半导体物理、元器件、应用电路和电路分析的全面概述。

问题和练习

3.1　在下图所示电路中，假设其中的二极管是理想的，请在坐标轴中画出 V_{out} 的输出波形。



3.2　当输入电压 $V_{in}=1.0\sin(2\pi t)$V 时，请在坐标轴中画出以下从(a)到(f)电路的输出 V_{out}。假设二极管是理想的，需要画出输入在一个完整周期下的输出($0\leqslant t\leqslant 1$s)。

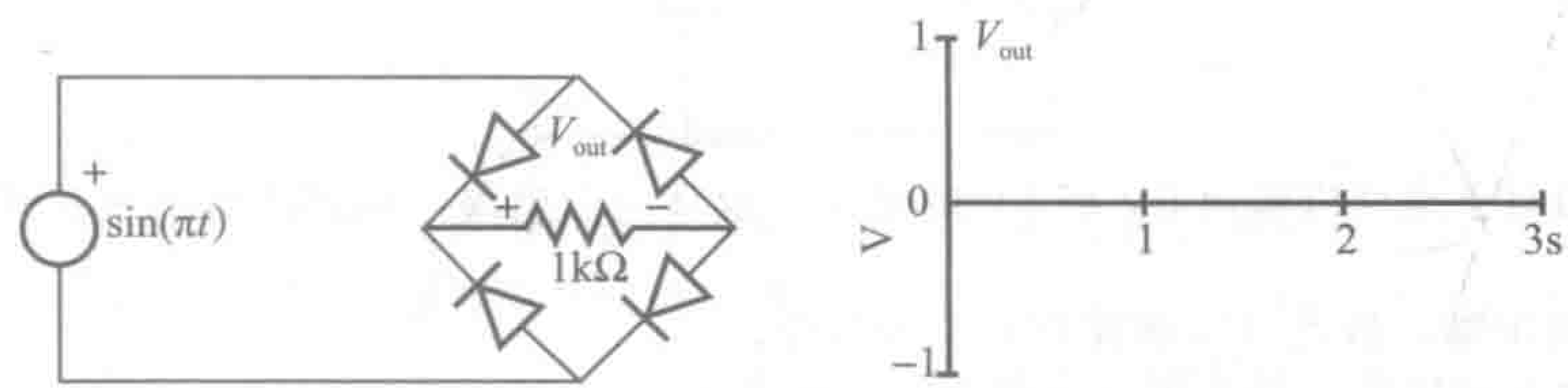


3.3　对课堂讨论项目 3.1 给出完整的回答。

3.4　对课堂讨论项目 3.2 给出完整的回答。

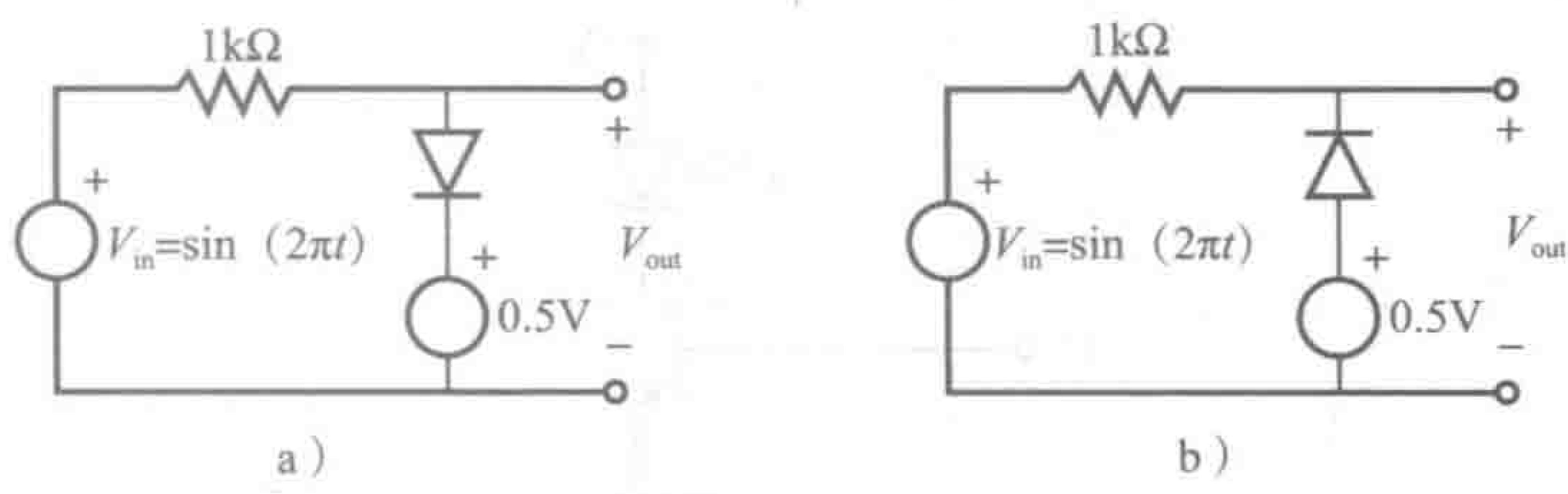
3.5　对课堂讨论项目 3.3 给出完整的回答。

3.6　假设二极管是理想的，请在坐标轴中画出下图所示电路的输出波形 V_{out}。此外，解释为什么这个电路称为**全波整流器**。



3.7　对课堂讨论项目 3.5 给出完整的回答。

3.8　以下电路称为**削波电路**。假设二极管是理想的，绘制在两个周期内与输入 V_{in} 对应的输出电压 V_{out}。

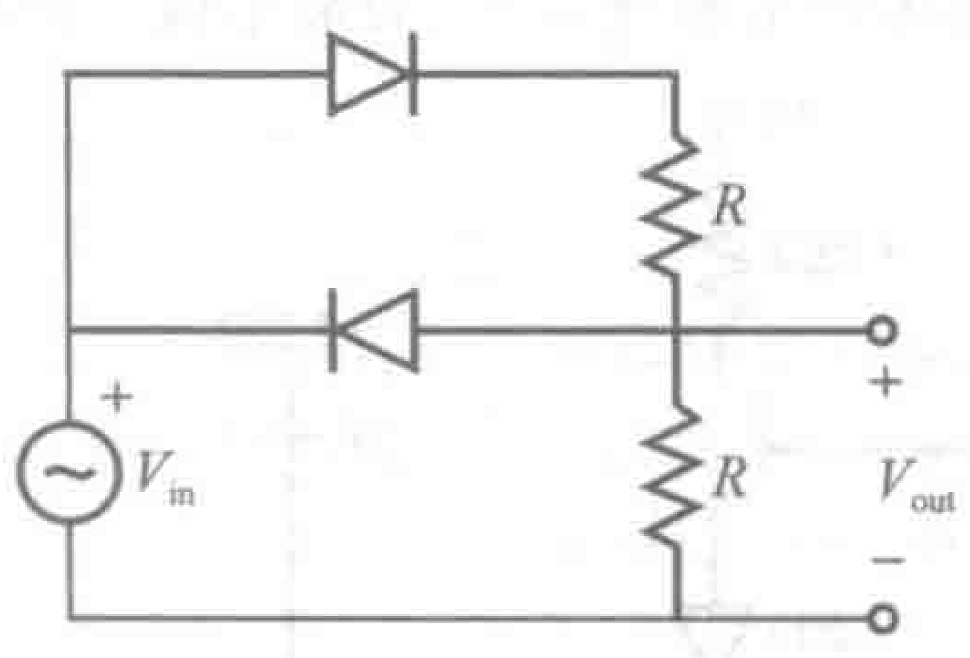


3.9　计算在例 3.3 的最终电路中的电流(I_1、I_2、I_3、I_4)和二极管电压(V_{diode})。

3.10　在例 3.3 中，假定当两个二极管都反向偏置时，计算 I_1、I_4 和 V_{AB}(节点 A 相对于节点 B 的电压)。根据电压 V_{AB}，判断哪个二极管的极性假设是正确的?

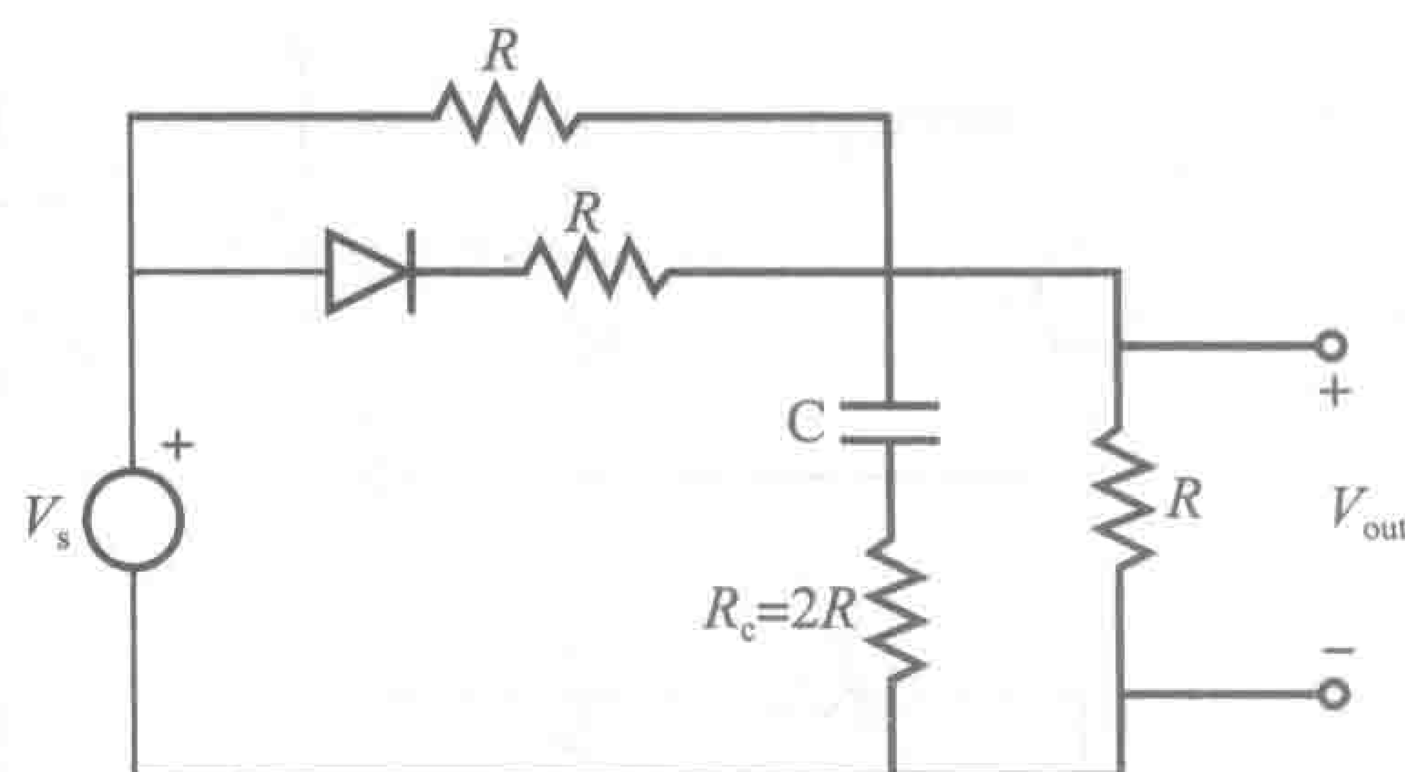
3.11　对课堂讨论项目 3.7 给出完整的回答。

3.12　对下图所示的电路，假设二极管是理想的，$R=1\text{k}\Omega$ 和 $V_{in}=10\sin(\pi t)$V，在带刻度的坐标轴上画出两个周期内输入对应的输出电压 V_{out}。



3.13　对下图所示的电路，计算在下列情况下 V_{out} 的稳态值、电容器两端的电压和电流值，以及流过输出电阻的电流值：

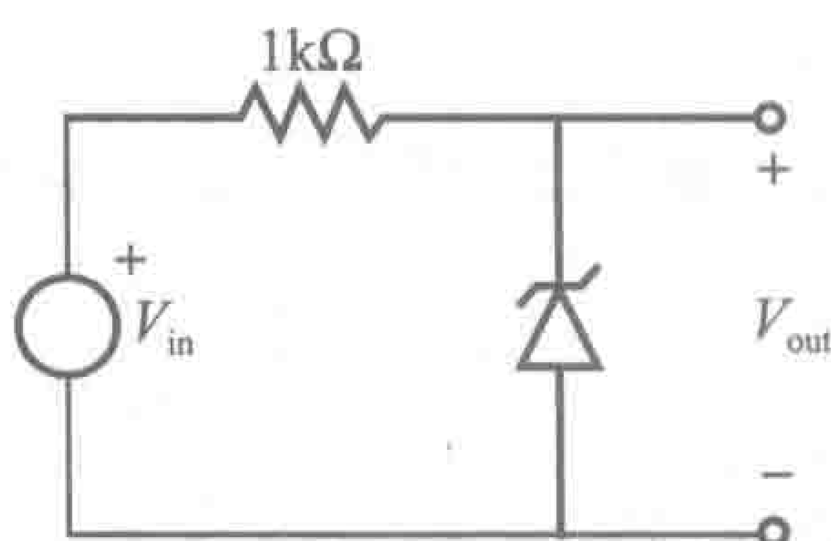
a. $V_s = 10\text{VDC}$
b. $V_s = -10\text{VDC}$



3.14　在课堂讨论项目 3.7 中 $V_{in} = 15\sin(2\pi t)$ V，$R_i = R_L = 1\text{k}\Omega$，请画出一个周期内的 V_{in} 和 V_{out}。假设二极管是理想的。

3.15　假设在下图所示的电路中，理想齐纳二极管的击穿电压为 5.1V，根据下列两种情况在一个坐标轴上画出输出电压：

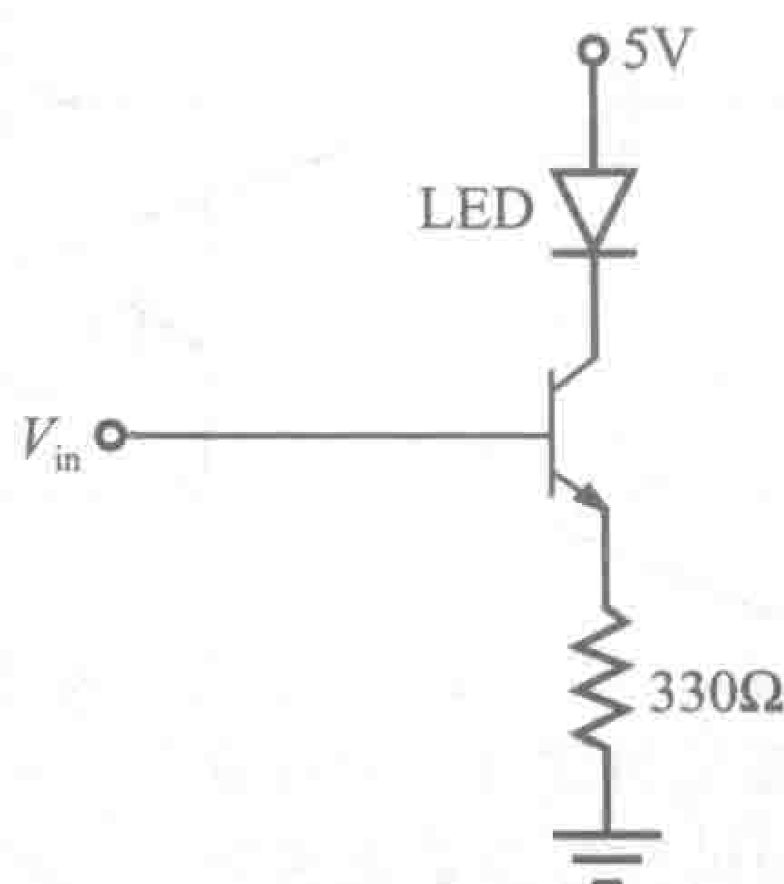
a. $V_{in} = 1.0\sin(2\pi t)$
b. $V_{in} = 10.0 + \sin(2\pi t)$



3.16　数字电路相对于地可以输出 0V 或 5V 的电压。设计一个电路，利用该输出来打开或关闭 LED，假设 LED：

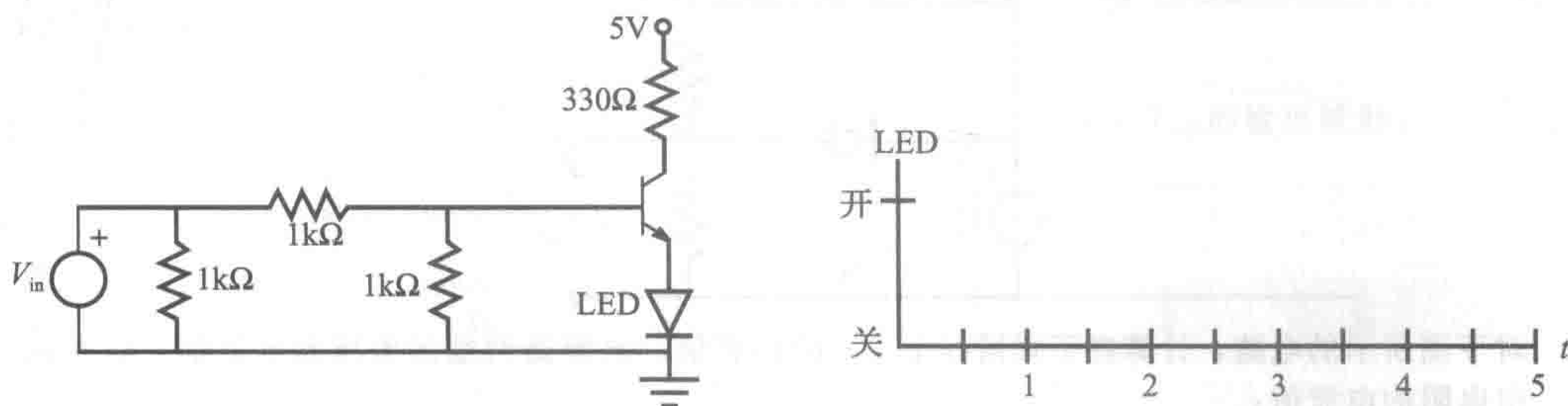
a. 没有正向压降，最大可以承载 50mA 的电流；
b. 有 2V 的正向压降，最大可以承载 50mA 的电流。

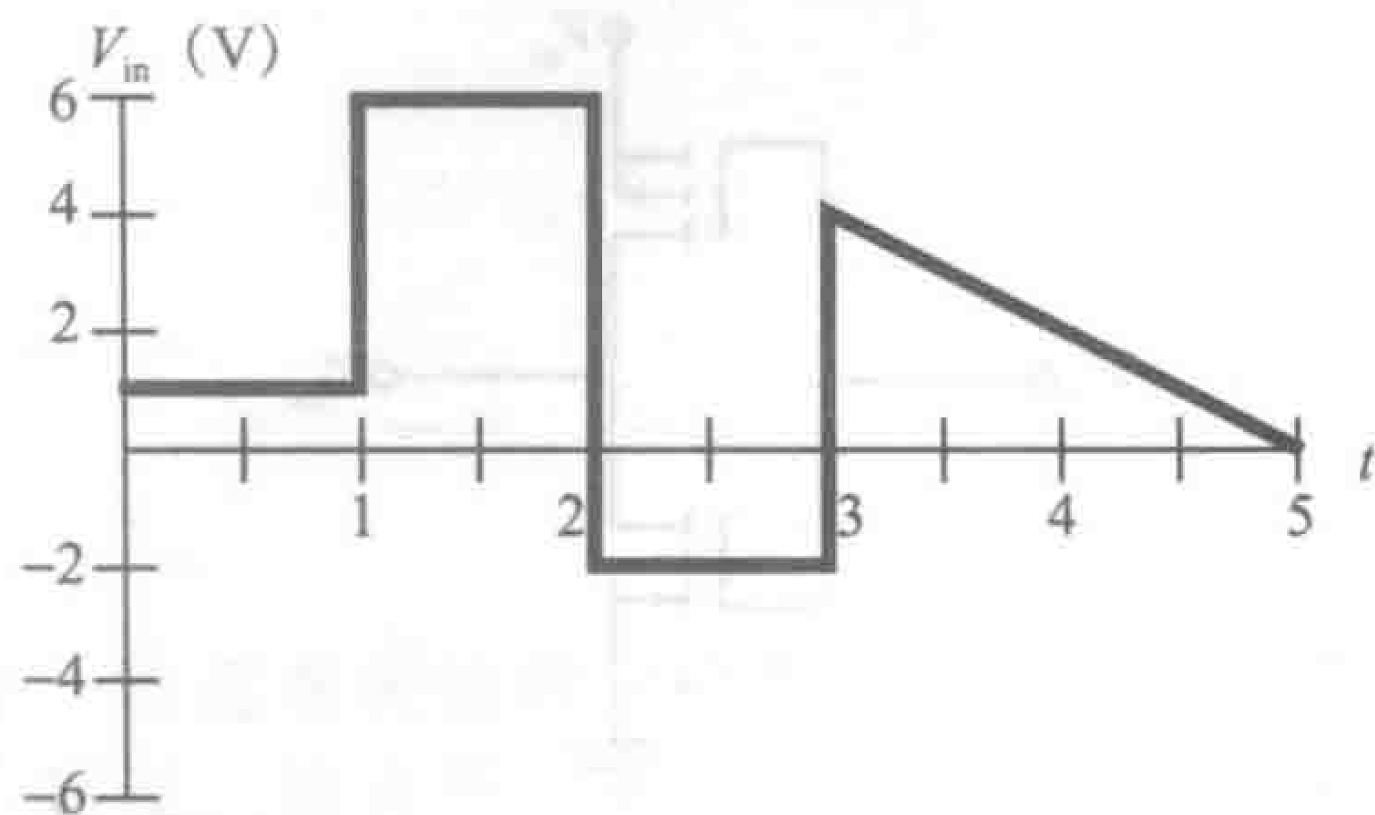
3.17　在下图所示的电路中，当最小稳态电压 V_{in} 是多少时，可以点亮 LED 并使晶体管处于完全饱和状态？假设 LED 的正向偏置电压为 2V，并且当晶体管饱和时集电极-发射极电压降为 0.2V。



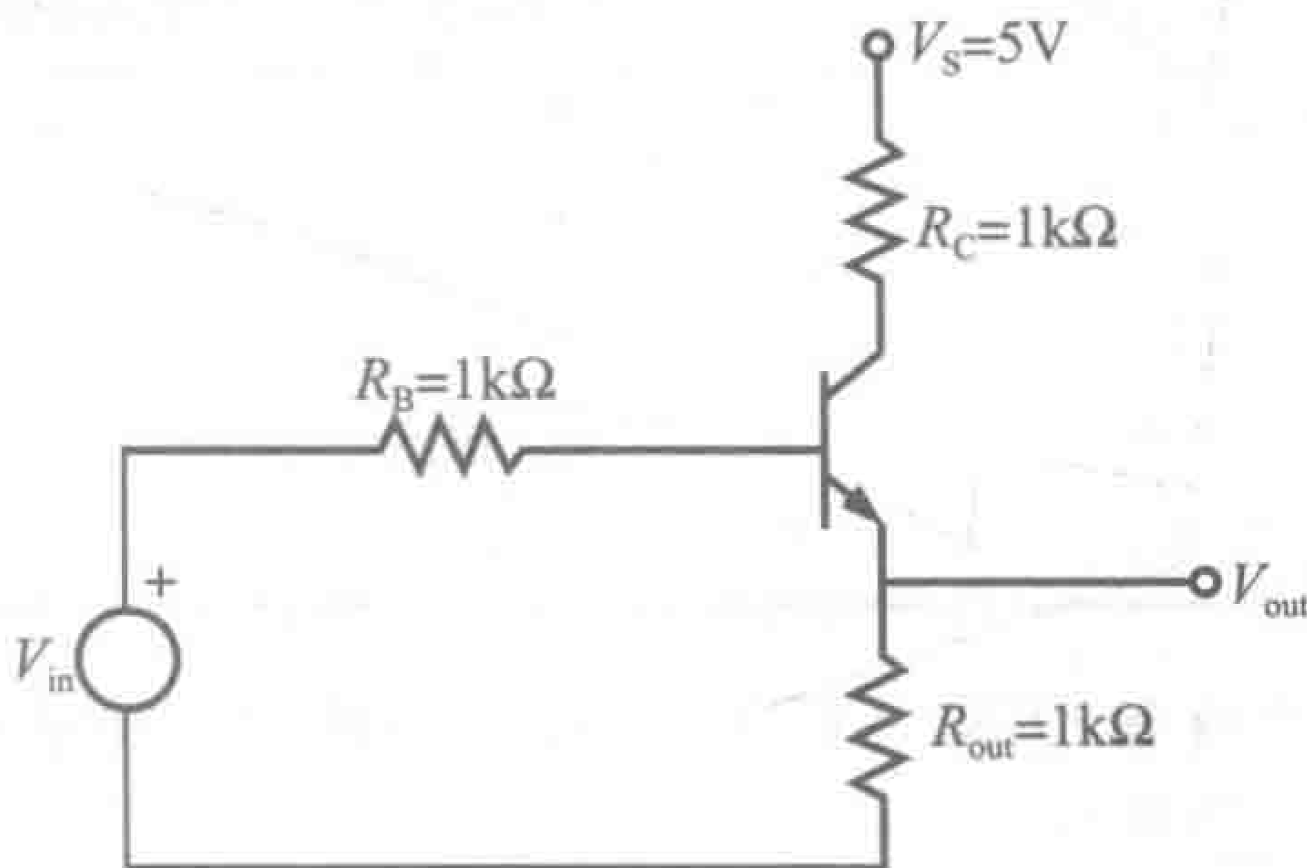
3.18　a. 对于以下电路给定 V_{in}（参见下图），假设晶体管的基极电流非常小（即假定 $I_B = 0$），在下面所示的坐标轴上画出 LED 开关曲线。假设 LED 有 1V 的正向偏置电压，同时假设 LED 开启时晶体管处于饱和状态。

b. 假设 β 为 100 时，计算使晶体管饱和所需 V_{in} 的最小值，此时 I_B 不再假设为 0。

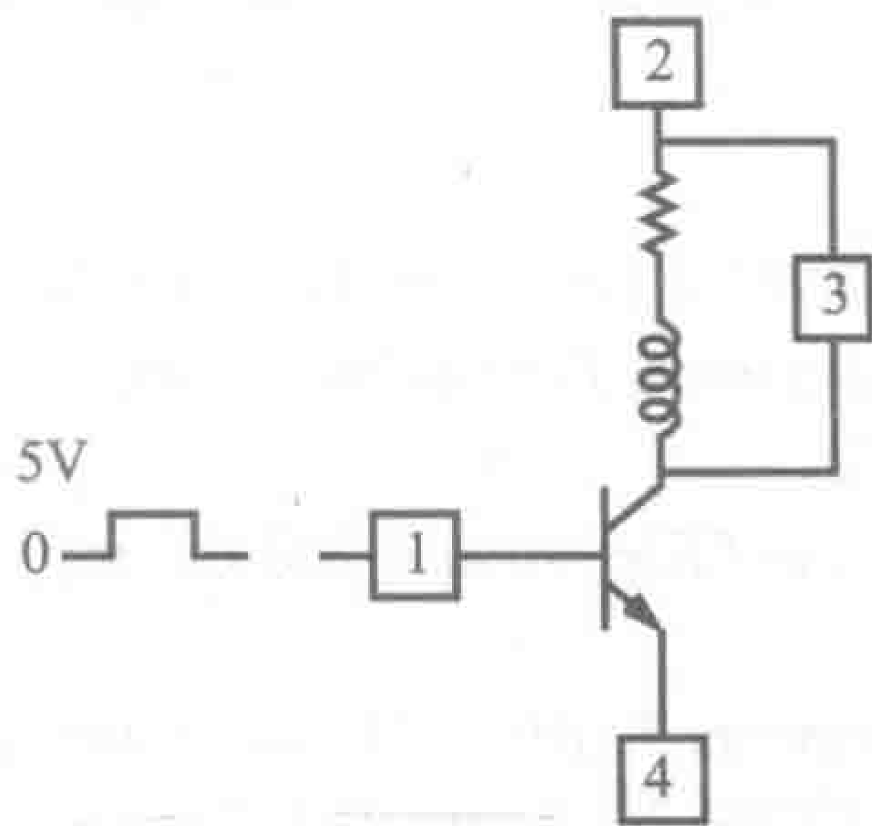




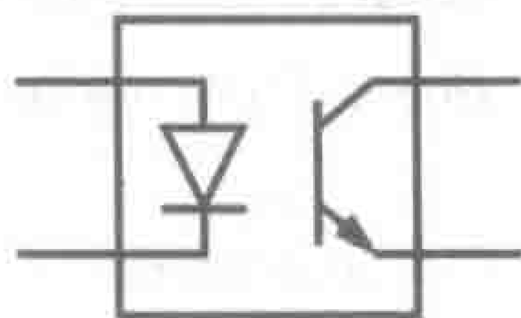
3.19 对于下图所示电路，为了让晶体管处于完全饱和状态，计算所需的最小 V_{in} 和产生的电压 V_{out}。假设晶体管的放大倍数 β 在完全饱和时为 100。



3.20 考虑使用 NPN 功率晶体管设计一个由数字信号(0V＝关，5V＝开)控制的固态开关。其原理图如下图所示，其中必须选择的元器件用数字标记。用串联电阻和电感代表电压为 24V 电流为 1A 的直流电动机。请用合适的原理图符号代替图中每个用数字标记的方框，然后尽可能完整地选定每一个元器件。



3.21 光断路器的封装中包括了光敏晶体管和对应的 LED，如以下原理图所示。需要添加什么样的外部电路才能使得光遮断器实现正常功能。请画出原理图。

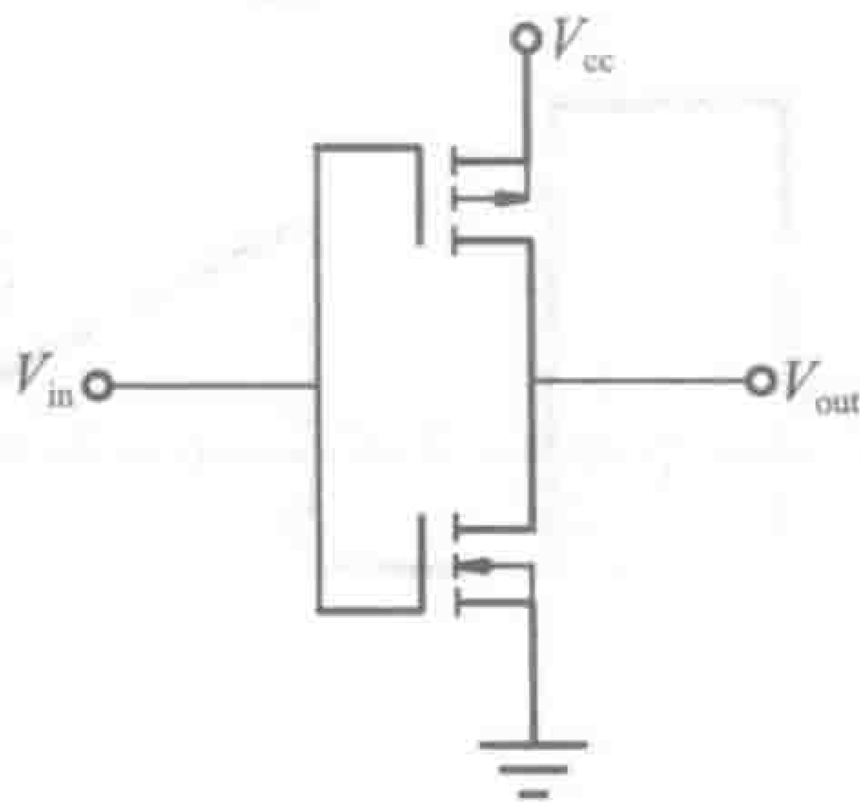


3.22 对图 3-31 所示的 MOSFET，根据图中数值估算完全导通时的漏源电阻 R_{on}。

3.23 将问题 3.20 中 NPN BJT 替换为 N 沟道增强型功率 MOSFET，回答问题 3.20。

3.24 在设计实例 3.4 中，假设 $V_s = 15V$。用 BJT 功率晶体管替换 MOSFET，并确定其类型(NPN 或 PNP)和所需的其他元器件。画出电路原理图并描述其特性。

3.25 大多数字 CMOS 器件的输出如下图所示，确定电路中用的是哪种 MOSFET。当输入 $V_{in} = 5V$ 和 $V_{in} = 0V$ 时，对应的输出 V_{out} 是多少？



3.26 下表列出了用于电路设计的各种 MOSFET。如果需要开关电压为 10V、电流为 10A，应该选择哪种 MOSFET，并解释原因。

MOSFET	V_{ds}/V	R_{ds}(on)/Ω	$I_d$cont@25℃/A	P_d(max)/W
IRF510	100	0.6	16	20
IRF530N	100	0.11	60	63
IRF540	100	0.077	110	150
IRF540N	100	0.052	110	94
IRF610	200	1.5	10	20

3.27 对于下面列出的 N 沟道增强型 MOSFET 中的每个状态，如果阈值电压 V_T 是 3V，试确定 MOSFET 分别处于哪种工作状态。

a. $V_{gs}=2V$，$V_{ds}=5V$

b. $V_{gs}=4V$，$V_{ds}=5V$

c. $V_{gs}=6V$，$V_{ds}=5V$

d. $V_{gs}=-2.5V$

参考文献

Bailar, J. et al., *Chemistry,* Academic Press, New York, 1978.

Gibson, G. and Liu, Y., *Microcomputers for Engineers and Scientists,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980.

Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics,* 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

Johnson, D., Hilburn, J., and Johnson, J., *Basic Electric Circuit Analysis,* 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

Lerner, R. and Trigg, G., *Encyclopedia of Physics,* VCH Publishers, New York, 1991.

McWhorter, G. and Evans, A., *Basic Electronics,* Master Publishing, Richardson, TX, 1994.

Millman, J. and Grabel, A., *Microelectronics,* 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1987.

Mims, F., *Engineer's Mini-Notebook: Basic Semiconductor Circuits,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5013, 1986.

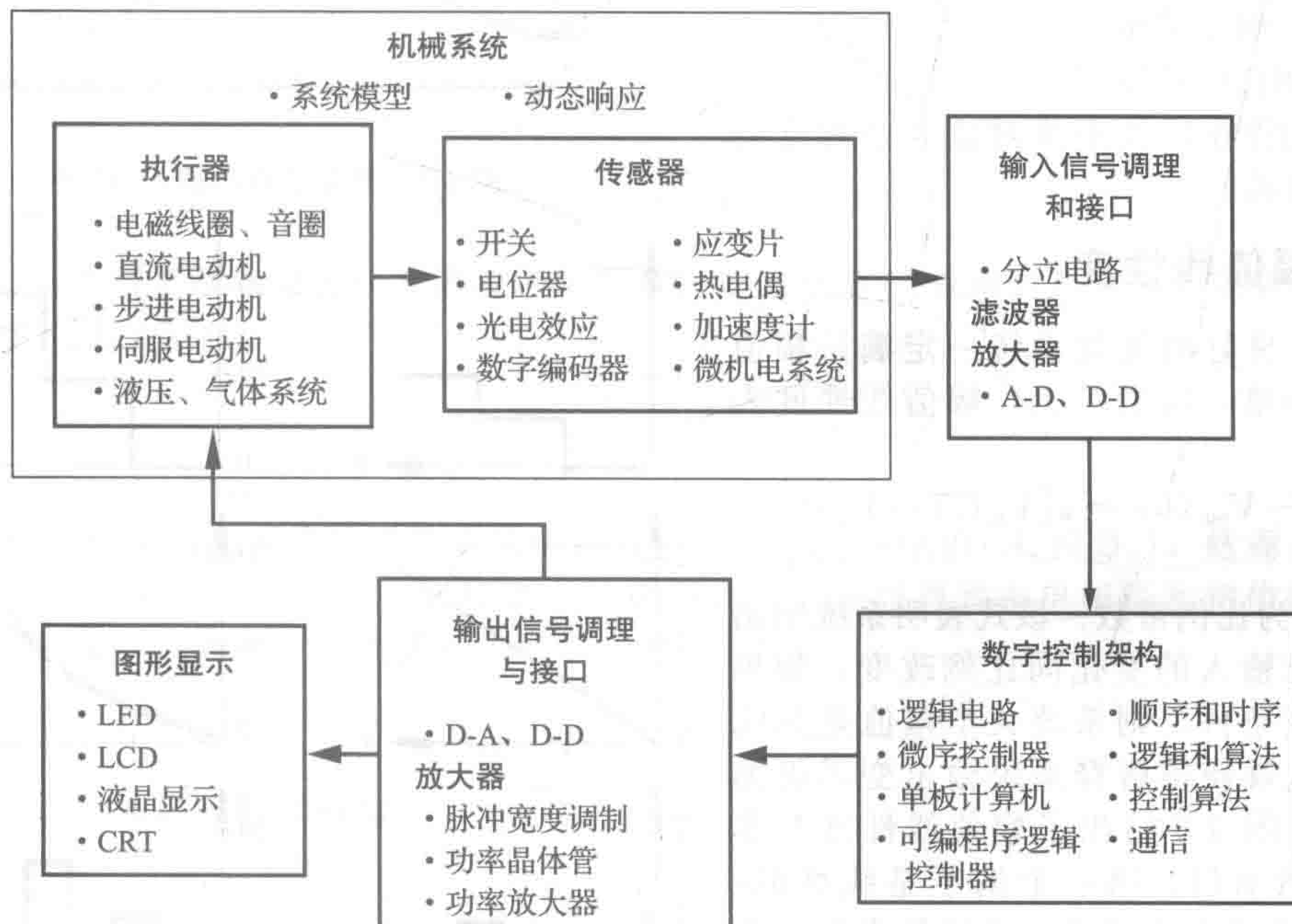
Mims, F., *Engineer's Mini-Notebook: Optoelectronics Circuits,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5012A, 1986.

Mims, F., *Getting Started in Electronics,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5003A, 1991.

Rizzoni, G., *Principles and Applications of Electrical Engineering,* 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 2005.

第4章 系统响应

本章主要介绍如何建立物理系统的数学模型及系统对动态输入信号响应的特征，这些主题对于理解执行器、传感器、放大器、滤波器和其他机电一体化系统组件如何运行十分重要。



本章目标

通过学习、讨论、研究和应用本章的内容，将达到：

1. 明白一个良好测量系统具备的3个特征：幅值线性度、相位线性度和足够的带宽；
2. 能够定义信号的傅里叶级数表示方法并采用该方法获得信号频谱的组成；
3. 掌握仪器的带宽与其输入和输出信号频谱之间的关系；
4. 掌握零阶、一阶、二阶测量系统与机电一体化系统的动态响应；
5. 能够应用阶跃和正弦输入信号分析测量系统和机电一体化系统的响应并描述其响应特征；
6. 明白机械系统、电气系统和液压系统之间的相似之处。

4.1 系统响应简介

机电一体化系统或测量系统的期望输出与实际输出之间的关系是分析系统响应的基础，本章涉及的分析技术主要用来描述和预测线性系统如何响应特定输入信号，测量系统通常是机电一体化系统的组成部分，本章主要关注测量系统。

正如第1章所看到的，一个测量系统包括3个组成部分：变送器、信号处理器和记录仪。变送器是用来将物理量转换为时变电压量的装置，其输出的电压量为**模拟信号**。信号处理器能够修正模拟信号，同时记录仪提供信号的瞬时显示或存储。待测的物理量称为测量

系统的输入，变送器将输入信号转换为能够与信号处理器相匹配的形式，从而使其成为测量系统的输出信号，但信号处理器反过来又会影响变送器输出的信号。如图 4-1 所示，通常记录仪的输出与测量系统的实际输入是不一样的。一般地，除非输入信号中有期望剔除的信息(如电气噪声)否则我们期望处理后的输出信号能够与输入信号尽可能匹配。

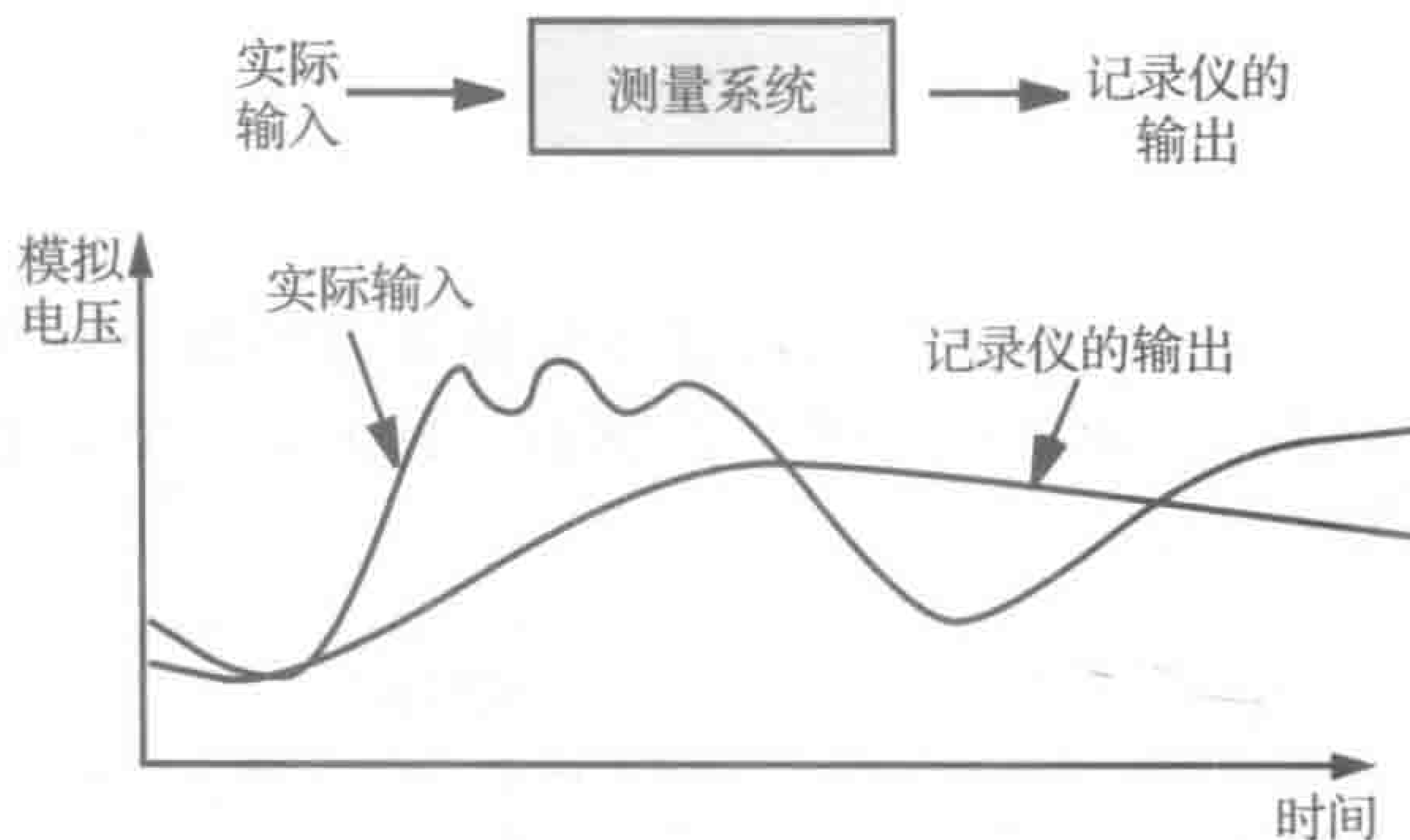


图 4-1 测量系统的输入-输出

为了实现对输入信号的适当再加工，一些特定条件必须得到满足。对一个具有时变输入的测量系统而言，为了保证测量的质量，必须满足下列 3 个标准：

1. 幅值线性度
2. 足够的带宽
3. 相位线性度

我们将在后续小节对这 3 个标准分别详细检验。

4.2 幅值线性度

一个良好的测量系统一定满足幅值线性度标准，在数学上，幅值线性度表示为：

$$V_{out}(t)-V_{out}(0)=\alpha[V_{in}(t)-V_{in}(0)] \tag{4-1}$$

其中，α 为比例常数。该式表明系统输出总与系统输入的变化同比例改变，如果不满足该条件，则系统关于幅值是非线性的，这就使得解释系统输出变得更加困难了。图 4-2 给出了幅值线性度与非线性度的示例。第一个例子是线性的，$\alpha=20$。后两个例子中 α 值不是常数，所以是非线性的。在第三个例子中，系统输出信号与第一个脉冲信号对应幅值之间的比例是 20，与第二个脉冲对应幅值之间的比例为 15。

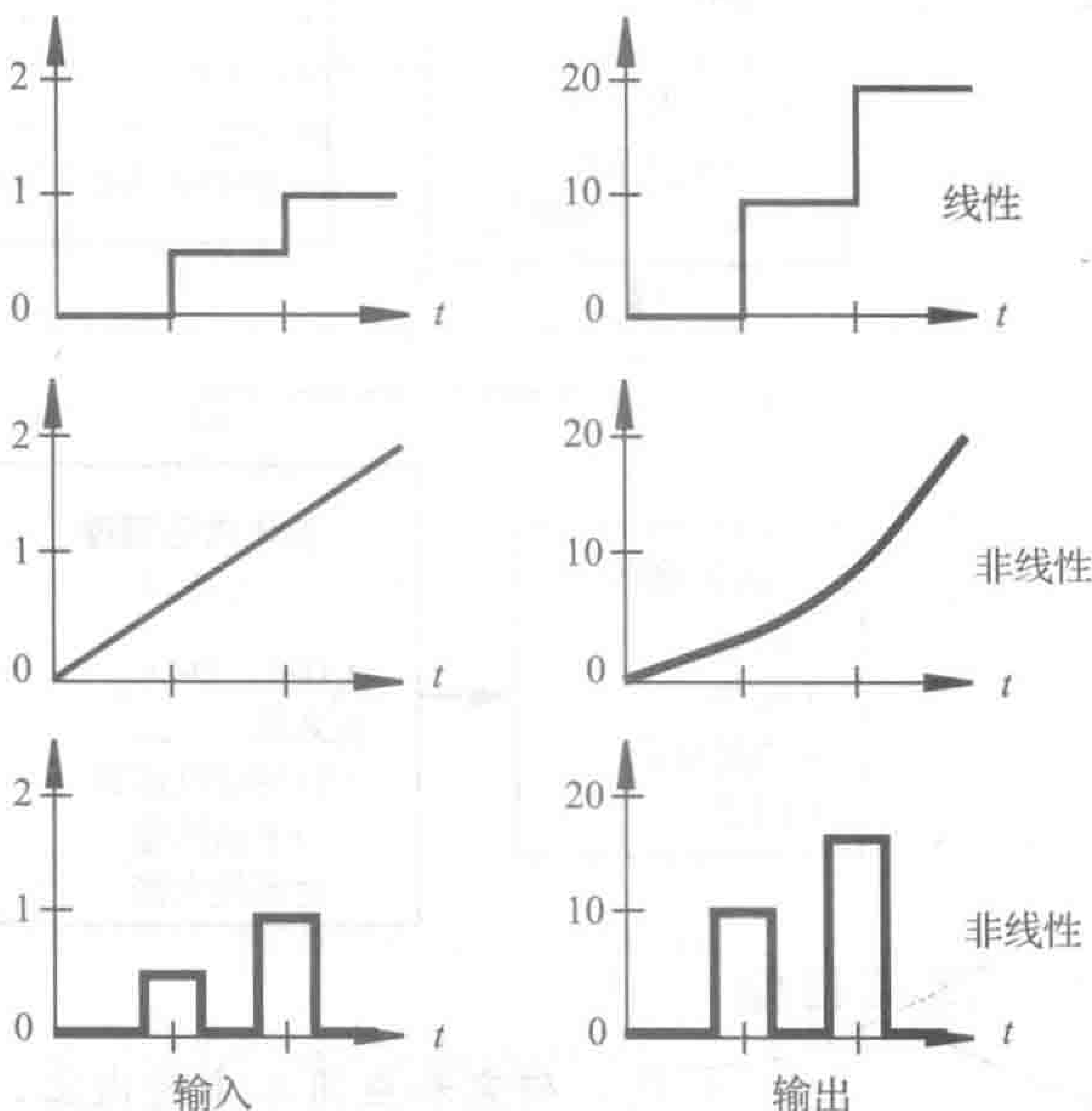


图 4-2 幅值线性度与非线性度

通常，在有限输入信号的幅值范围内，测量系统满足幅值线性度的要求。同样，当输入信号的幅值在一定限度内变化时，系统的输出常常也是线性变化的。第二个问题与系统的带宽有关，将在 4.4 节进行阐述。一个理想的测量系统关于具有任意幅值或频率的输入信号都有幅值线性度。

4.3 信号的傅里叶级数表示

带宽与相位线性度将应用于输入信号的频率组成，在介绍这两个概念之前，首先必须回顾信号的**傅里叶级数**表示的概念。信号傅里叶级数表示的基本前提是任意周期性波形都可以表示为由不同幅值与频率的正弦或余弦波形构成的无穷级数，这些无穷级数叠加则可以恢复出原始的周期性波形。这意味着我们可以获得任意复杂但具有周期性的波形，并且可以将之分解成由正弦与余弦波形构成的级数。实际上，因为有限长的正弦和余弦波形就足够用来表示原始的周期性波形，所以合成原始周期性波形并不需要全部的无穷级数。

我们定义**基础频率**或**基波频率** ω_0 为周期性波形中的最低频率分量，基波频率与信号的周期 T 成反比：

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0 \tag{4-2}$$

其中，f_0 为基波频率，单位为赫兹(Hz)。周期性波形所包含的其他正弦与余弦波频率是基波频率的整数倍，二次谐波的频率为 $2\omega_0$，三次谐波的频率为 $3\omega_0$，其余以此类推。任意周期性波形 $f(t)$ 的傅里叶级数表示的数学表达式为：

$$F(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega_0 t) \tag{4-3}$$

其中，常数 C_0 为信号中的直流分量，两求和项为由正弦波和余弦波构成的无穷级数。正弦分量与余弦分量的系数为：

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(n\omega_0 t)\mathrm{d}t \tag{4-4}$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(n\omega_0 t)\mathrm{d}t \tag{4-5}$$

式中，$f(t)$ 为待表示的波形；T 为波形的周期。直流分量 C_0 表示波形在一个周期上的平均值，因此，可以表示为：

$$C_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\mathrm{d}t = \frac{A_0}{2} \tag{4-6}$$

A_0 可通过将 $n=0$ 代入式(4-4)求得。

在式(4-3)给出的傅里叶级数表示中，含有两个不同的幅值(A_n 和 B_n)，然而，余弦和正弦分量可以利用三角恒等式(见问题 4-4)进行合并，从而得到由单幅值和相位描述的另一种表示方法。这种表示方法为：

$$F(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \tag{4-7}$$

式中，各次谐波对应的幅值为：

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \tag{4-8}$$

各次谐波对应的相位为：

$$\phi_n = -\arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \tag{4-9}$$

为了说明傅里叶级数的应用和含义，采用理想方波作为周期性波形。图 4-3 中描述的方波在数学上可以定义为

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant t < T/2 \\ -1, & T/2 \leqslant t < T \end{cases} \tag{4-10}$$

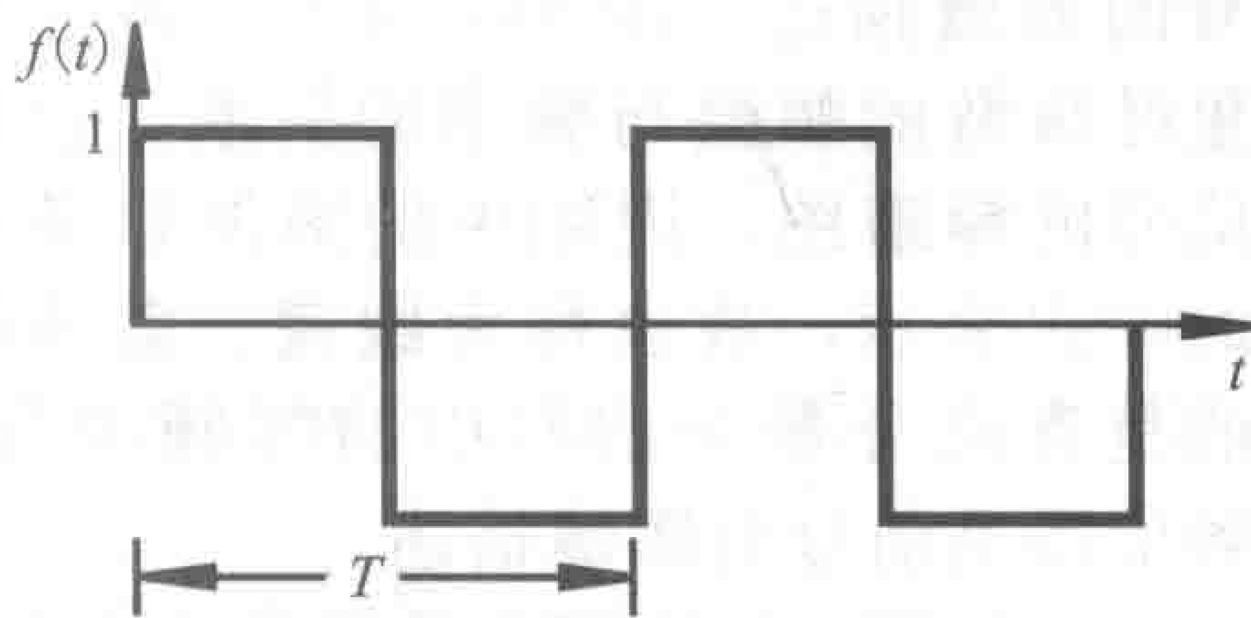


图 4-3 方波

式中，T 为周期，波形在 $t=0$ 与 $T/2$ 处不连续。

对于由式(4-10)定义的方波，系数 A_n(包括 A_0)全部为 0(参见问题 4.5)。系数 B_n 可由式(4-5)求得：

$$B_n = \frac{2}{T}\left(\int_0^{T/2} \sin(n\omega_0 t)\mathrm{d}t - \int_{T/2}^{T} \sin(n\omega_0 t)\mathrm{d}t\right) \tag{4-11}$$

积分结果为：

$$B_n = \frac{2}{T}\left(-\frac{1}{n\omega_0} \mid \cos(n\omega_0 t) \mid_0^{T/2} + \frac{1}{n\omega_0} \mid \cos(n\omega_0 t) \mid_{T/2}^{T}\right) \tag{4-12}$$

式(4-2)代入式(4-12)可得：

$$B_n = \frac{1}{n\pi}[-\cos(n\pi) + 1 + 1 - \cos(n\pi)] \tag{4-13}$$

可以写成：

$$B_n = \frac{2}{n\pi}[1-\cos(n\pi)] = \begin{cases} \frac{4}{n\pi}, & n\text{ 为奇数} \\ 0, & n\text{ 为偶数} \end{cases} \tag{4-14}$$

因此，幅值为1的方波的傅里叶级数表示为：

$$F(t) = \frac{4}{\pi}\sin(\omega_0 t) + \frac{4}{3\pi}\sin(3\omega_0 t) + \frac{4}{5\pi}\sin(5\omega_0 t) + \cdots \tag{4-15}$$

或者，采用无穷求和的形式：

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n-1)\pi}\sin[(2n-1)\omega_0 t] \tag{4-16}$$

图4-4给出了阶次逐步递增时对各次谐波合成结果的影响。MathCAD示例4.1包括创建图形的分析方法。图4-4中左侧为各次谐波及其频率和幅值。需要注意，随着谐波频率的增加，谐波幅值逐渐递减。图4-4中右侧为各次谐波的叠加，描述了叠加高次谐波如何改善方波的表示。如果将一次、三次和五次谐波叠加在一起，可以获得一个看上去与方波比较相似的波形，当再叠加其他阶次的谐波后，波形复现的质量会得到改善且波形变得更好近似。如果无穷阶次谐波进行叠加，其结果必是一方波。许多波形，如方波，都存在不连续等特性突变或快变，需要很多高次谐波的叠加才能获得较好的波形复现效果。

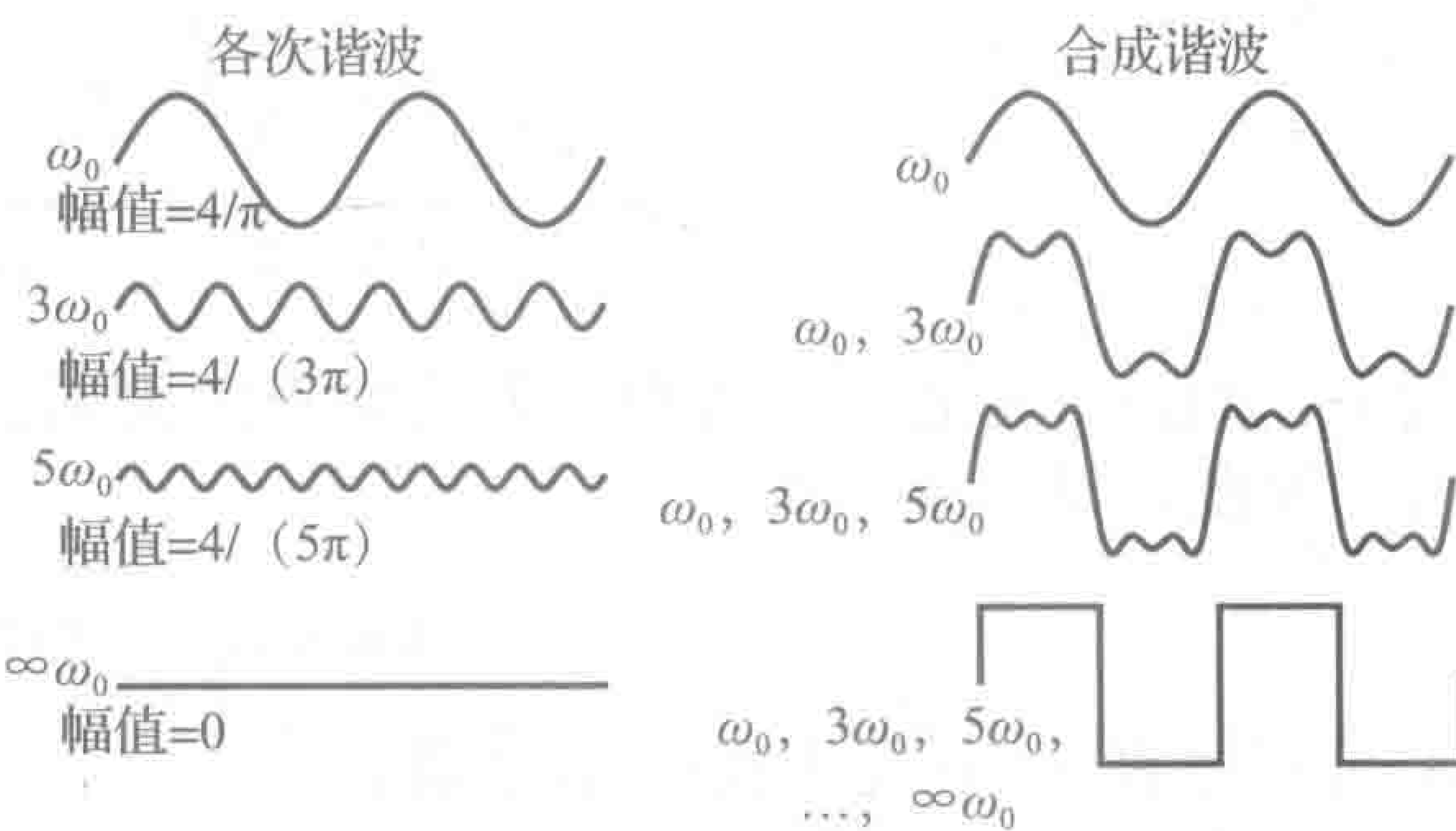


图4-4 方波的谐波分解

图4-5中的上半部分给出了一直流分量为1.5的单位幅值方波，这称为信号的**时域**描述。图4-5的下半部分为傅里叶级数的幅值与频率的关系，这称为信号的**频谱**图，因图中的谐波以条或线的方式表示，故也称为**线谱**。需要注意的是直流分量为信号中的零频率分量。频谱图是信号的**频域**描述。

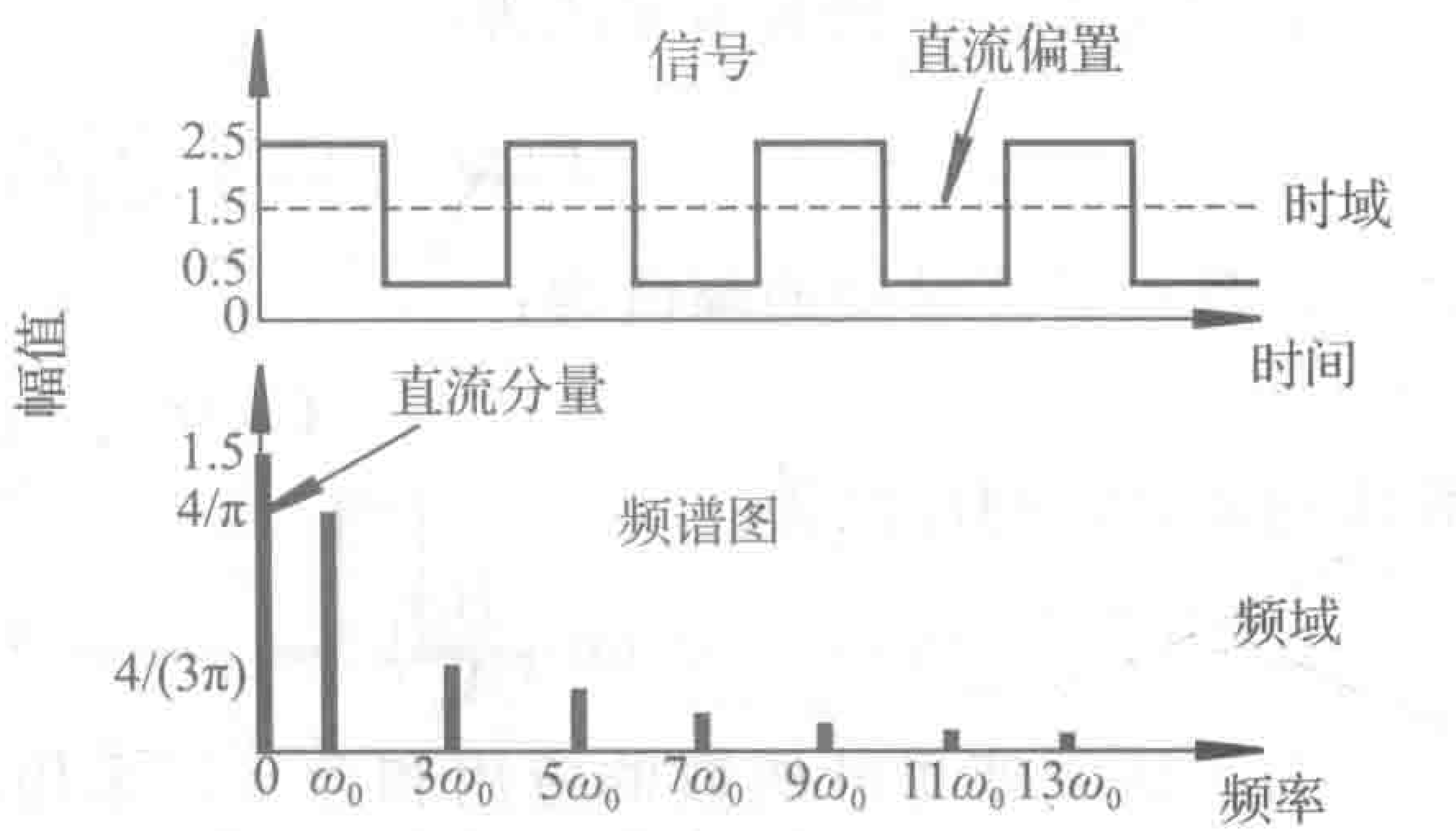


图4-5 方波的频谱

当绘制一个用傅里叶级数表示描述的信号频谱时，必须采用式(4-7)给出的单边幅值方式。对于由式(4-15)给出的方波傅里叶级数，系数 A_n 为0，系数 C_n 与系数 B_n[参见式(4-8)]相同。图4.5所示的每一根条代表一个不同的幅值，第一根条代表直流分量：$C_0=B_0=1.5$。第二根条表示式(4-15)中的第一项：$C_1=B_1=4/\pi$。剩余的条表示更高次非零谐波(B_3，B_5，…)。

视频演示4.1显示了由函数发生器产生的不同输出信号的频谱，数字示波器使电信号的频谱显示变得很简单，可观测快变(例如，尖角)信号如何含有大幅值高频谐波。

网络链接4.1提供了各种信号的频谱概念如何应用于声乐理论的资源与演示。声音由压力波构成，传声器获取压力信号并将压力信号转换为便于处理与显示(如在示波器上显示)的电压信号。根据不同声音的频谱内容即可区分出声音特征(音色)(参见课堂讨论项目4.1)。此外，将音符(也就是音高)定义为声音的基频，声音信号的幅值决定了它的音量(也就是响度)，视频演示4.2至4.7给出了这些概念的不同示例。

课堂讨论项目 4.1 音乐谐波

应用所掌握的谐波知识，解释下列音乐现象：

- 为什么长笛上的C调与小提琴上的C调不同？
- 在挑起弦前吉他手一根手指放在弦线中点以达到和声的效果。解释为什么可以改变所产生声音的质量。
- 当压下延音踏板（允许所有弦线成自然环状）的同时击打钢琴中央C，为什么除了中央C其他弦线开始振动？哪根弦振动的振幅最大？

4.4 带宽和频率响应

在选择系统进行信号测量时，估计信号频谱十分重要。理想状态下，测量系统必须能够复现信号中包含的所有频率分量，然而，实际系统完全复现所有频率的能力具有局限性。用来度量测量系统对不同频率分量复现的保真度的单位是**分贝**，当一信号通过测量系统时，这种对数尺度可以用来比较信号不同幅值的变化。分贝(dB)定义为：

$$\mathrm{dB}=20\lg\left(\frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}\right) \tag{4-17}$$

式中，A_{in}为输入信号中特定谐波的幅值，A_{out}为输出信号中特定谐波的幅值。

图4-6所示的图形是系统的**频率响应曲线**，也称为**伯德图**。它反映了输出信号与输入信号的**幅值比**（$A_{\text{out}}/A_{\text{in}}$）与输入信号频率之间的关系，体现了输入信号中各频率分量通过系统后如何被放大或衰减。术语**带宽**用来量化系统能够充分地复现信号频率的范围，系统带宽定义为系统输入信号**衰减**小于3dB对应的频率间隔。如图4-6所示，系统常常包含与幅值衰减3dB相对应的两个频率，分别定义为**下转折**频率（截止频率）ω_{L}和**上转折**频率（截止频率）ω_{H}，上下截止频率确定了系统带宽：

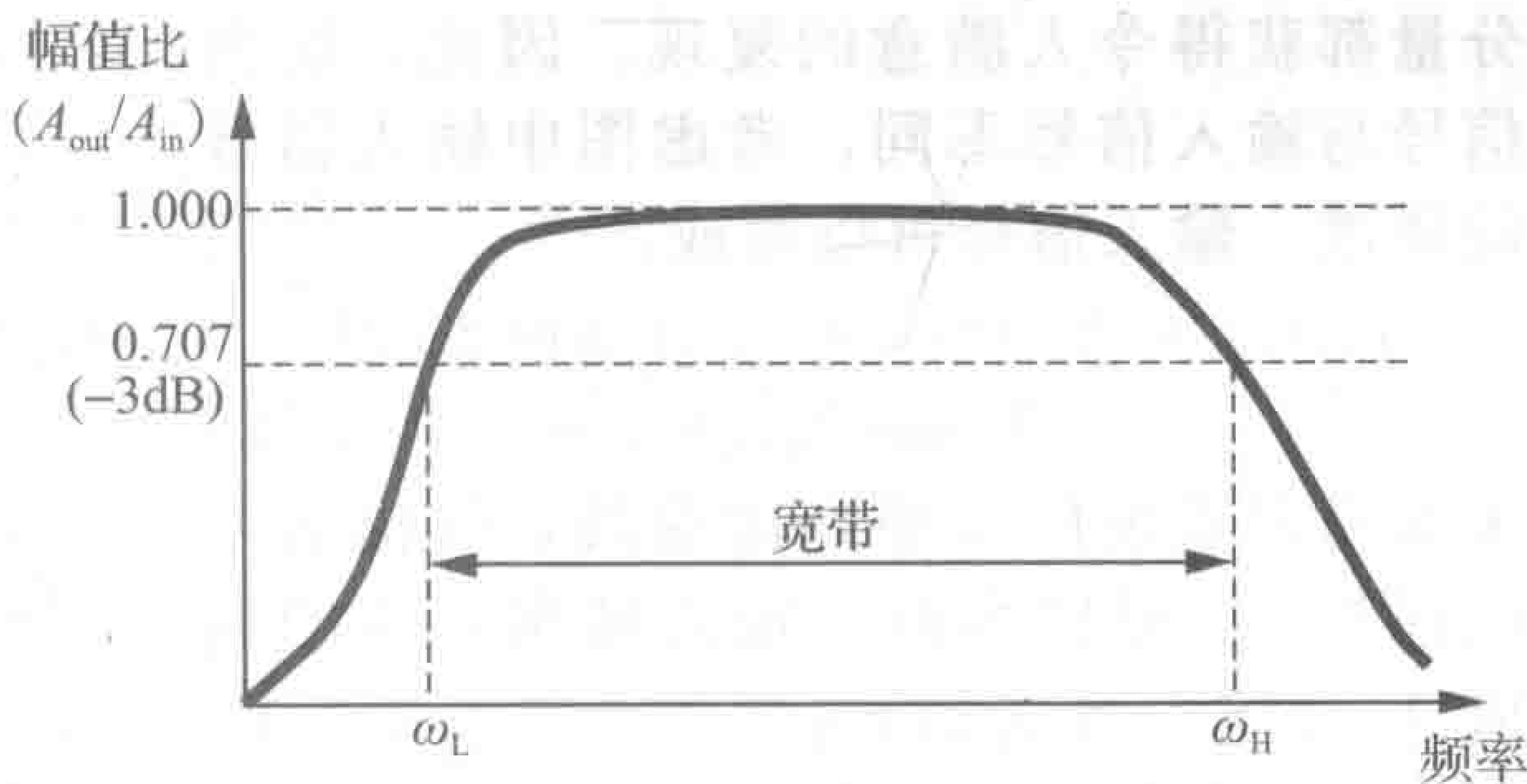


图4-6 频率响应与带宽

$$\text{bandwidth}=\omega_{\text{L}}-\omega_{\text{H}} \tag{4-18}$$

测量系统在低频段（也就是$\omega_{\text{L}}=0$）一般没有衰减，仅在高频段幅值比减少。对这些系统而言，系统带宽为0（直流）到ω_{H}。

−3dB截止为输出信号功率（P_{out}）衰减至输入信号功率（P_{in}）的一半对应的分贝值：

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}=\frac{1}{2} \tag{4-19}$$

为此，截止频率也称为半功率点。正弦信号的功率与信号幅值的平方成正比，从而，在截止值处有，

$$\frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}}=\sqrt{\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}}=\sqrt{\frac{1}{2}}\approx 0.707 \tag{4-20}$$

因此，在截止频率处，信号幅值衰减了29.3%（为原信号幅值的70.7%），近似为−3dB：

$$\mathrm{dB}=20\lg\sqrt{\frac{1}{2}}\approx-3\mathrm{dB} \tag{4-21}$$

首先，通过定义带宽来排除带宽范围外的频率分量，这看上去似乎不合逻辑，半功率点诚然有点武断，但是如果一直坚持应用，它可以比较各种仪器和系统的响应。带宽外所

有信号的幅值至少衰减 3dB，带宽内的信号，特别是接近截止频率处的信号，也可能衰减，但是小于 3dB。

理想测量系统的频率响应在从零到无穷大的频率区间上幅值比为 1，理想系统可以无放大或无衰减地复现所有谐波。然而，实际系统存在有限带宽，系统的带宽受多个因素的影响，如电气系统中的电容、电感和电阻以及机械系统中的质量、弹簧和阻尼。通过精心设计，合理选择这些元器件可以获得期望的带宽，经合理设计的测量系统可以在典型输入信号下复现所有的频率分量，如果能够实现，该系统则显示出高保真度。

课堂讨论项目 4.2　使用有限带宽的系统测量方波

假设有一套测试系统，其带宽为 $0\sim5.1\omega_0$，系统对截止频率以下的信号没有衰减，对截止频率以上的信号完全衰减。如果系统的输入是基频为 ω_0 的方波，描述系统输入和输出之间的差别。

合理设计或选择测量系统需要理解测量系统的带宽和信号频谱。图 4-7 举例说明了一输入信号的频谱、测量系统的频率响应和由系统输出信号引起的频谱，所有图使用相同的频率刻度。测量系统存在有限带宽，所以它并不能使输入信号的所有频率分量都获得令人满意的复现。因此，输出信号与输入信号不同，考虑图中输入信号的频谱，输入信号可以写成：

$$V_{in}(t)=A_1\sin(\omega_0 t)+A_2\sin(2\omega_0 t)+A_3\sin(3\omega_0 t)+\cdots \qquad (4\text{-}22)$$

考虑测量系统的频率响应曲线，输出信号的幅值 A_i' 可以由每个输入频率对应的幅值 A_i 决定，等式如下：

$$A_i'=(A_{out}/A_{in})_i\times A_i \qquad (4\text{-}23)$$

其中，i 为频率分量的个数。例如，$i=2$ 与频率 $2\omega_0$ 对应，

$$A_2'=(A_{out}/A_{in})_2\times A_2=0.25A_2 \qquad (4\text{-}24)$$

对每一个频率分量应用式(4-23)可以得到图 4-7 下部显示的频谱，输出信号可以写成：

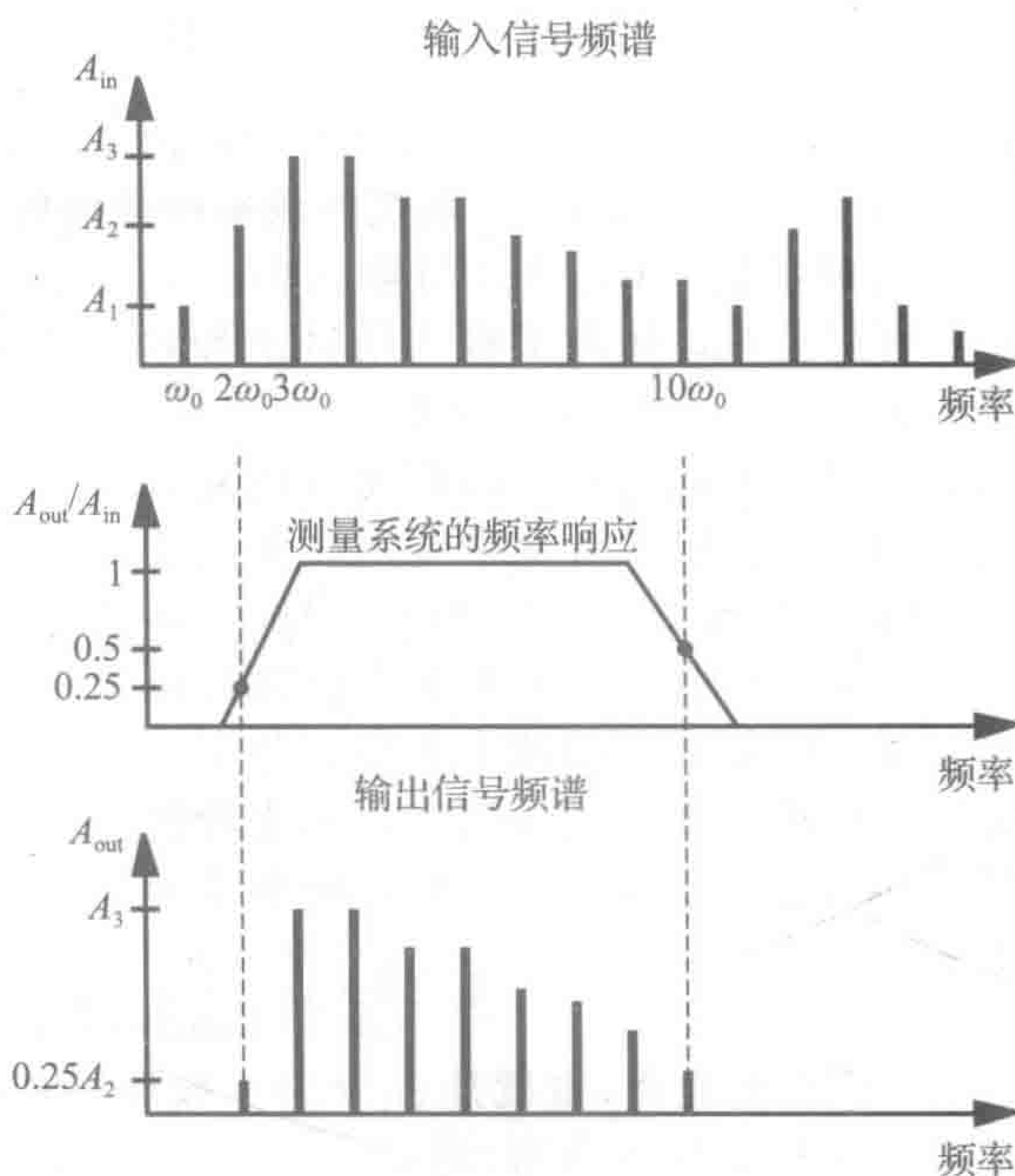


图 4-7　测量系统的带宽对信号频谱的影响

$$V_{out}(t)=A_2'\sin(2\omega_0 t)+A_3'\sin(3\omega_0 t)+\cdots+A_9'\sin(9\omega_0 t)+A_{10}'\sin(10\omega_0 t) \qquad (4\text{-}25)$$

或

$$V_{out}(t)=0.25A_2\sin(2\omega_0 t)+A_3\sin(3\omega_0 t)+\cdots+A_9\sin(9\omega_0 t)+0.5A_{10}\sin(10\omega_0 t) \qquad (4\text{-}26)$$

因为在 $3\omega_0\sim9\omega_0$ 的频率区间(包括 $3\omega_0$ 和 $9\omega_0$)，$A_{out}/A_{in}=1$。对于 i 在 3～9 范围内，$A_i'=A_i$。因为对于 ω_0 和所有超过 $10\omega_0$ 的频率分量 $A_{out}/A_{in}=0$，所以这些频率分量会完全衰减且在输出信号中再也不存在(即 $A_1'=A_{11}'=A_{12}'=\cdots=0$)，$2\omega_0\sim10\omega_0$ 之间的频率分量在输出信号中仍然存在，但是其幅值部分衰减($0<A_{out}/A_{in}<1$)。

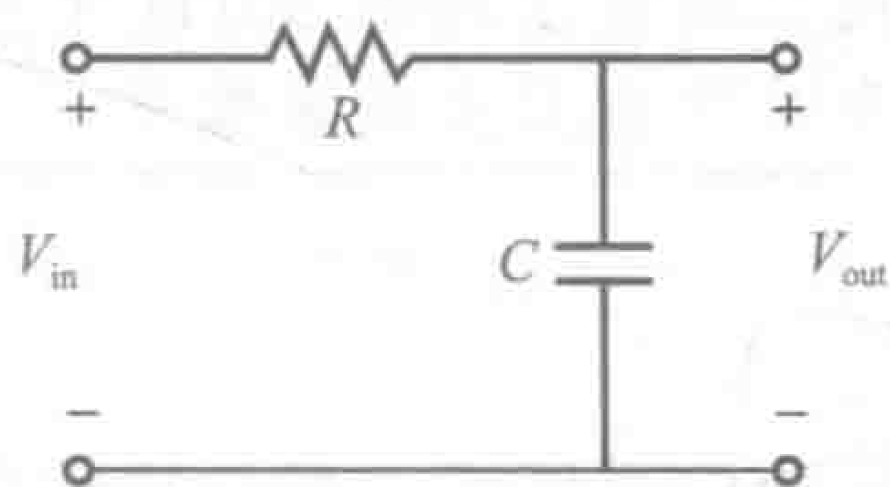
设计或选择测量系统时，为了对输入信号中的重要频率分量具有充足的复现精度，足够大的系统带宽是十分重要的。一个不能复现高频信号的测量系统一定不能精确复现与高

频有关的快变信号。

为了用实验方法确定系统带宽，需要在期望的频率范围内系统地应用纯正弦信号作为输入并确定输出与输入信号的幅值比。函数发生器根据设定时间可以产生线性递增的频率，扫描其特征能够为测定以电信号作为输入的系统带宽提供一种方便的测量方法。实验练习4将这种方法应用到滤波电路中(参见视频演示4.8中的示例)。一种确定系统模型频率响应的理论方法将在4.10.2节介绍，例4.1描述了将该技术应用于简单RC滤波器的基础知识。

例 4.1 电气网络的带宽

利用2.6节介绍的稳态交流电路分析技术，可以很容易地确定电气系统的带宽。考虑下图所示RC电路的例子：



对于电阻($Z_R=R$)和电容($Z_C=1/j\omega C$)的复阻抗应用分压规则，可得上图电路的输出电压为：

$$V_{out}=\frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C}+R}V_{in}$$

因此，输出和输入的比值为频率的函数：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{1}{j\omega RC+1}$$

对上述复数取模即可获得输出与输入的幅值比，该幅值比也为频率的函数：

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|=\frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

该电路的截止频率 ω_c 为：

$$\omega_c=\frac{1}{RC}$$

因为当 $\omega=\omega_c$ 时：

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|=\frac{1}{\sqrt{2}}=0.707$$

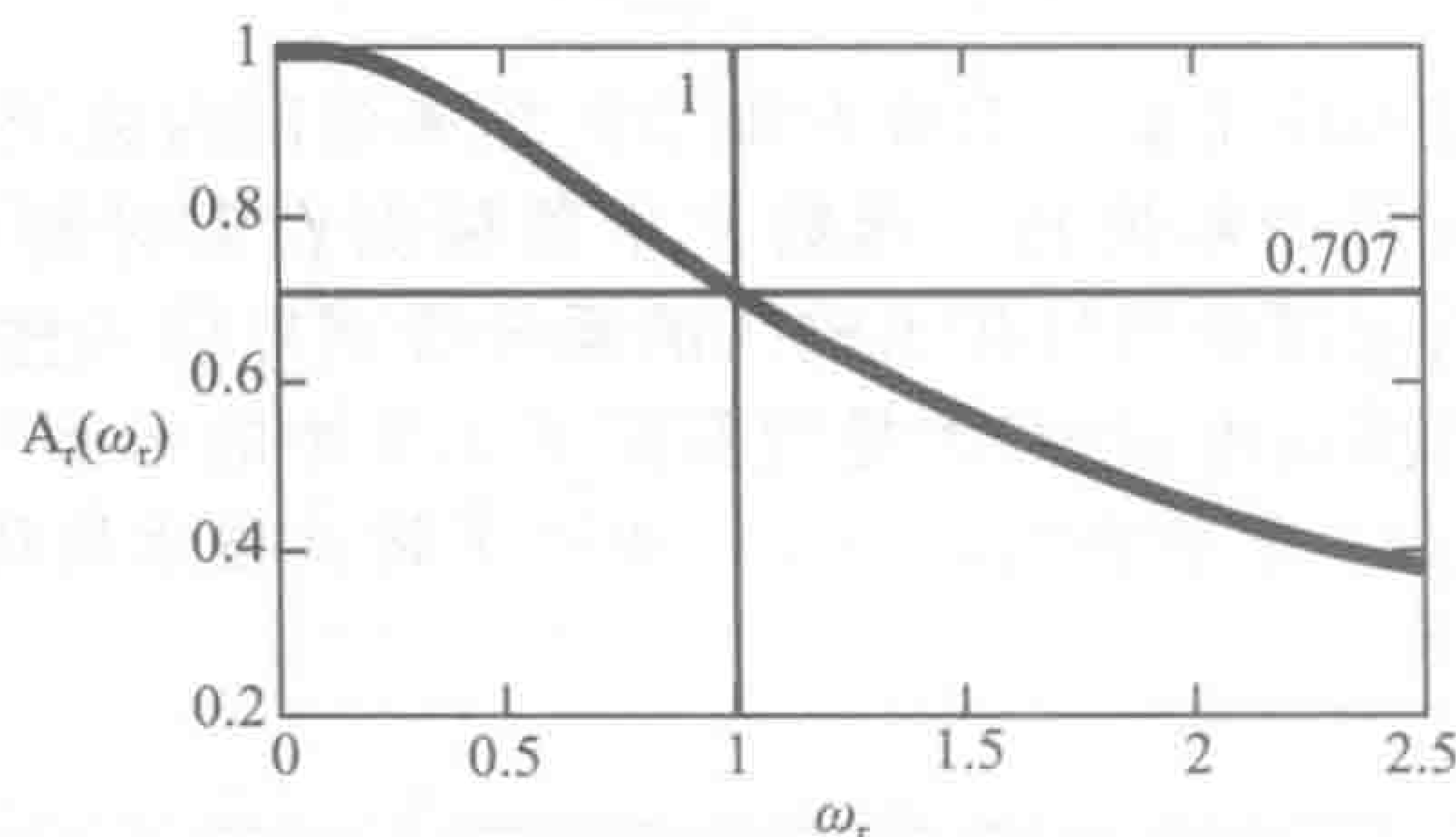
应用 ω_c 可将幅值比表示为：

$$\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|=\frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^2}}$$

下图给出了上述关系的频率响应曲线，图中 $\omega_r=\omega/\omega_c$，$A_r=|V_{out}/V_{in}|$。注意到，当 ω_r 趋于0时，A_r 趋于1，而当 ω_r 趋于∞时，A_r 趋于0。MathCAD例4.2包含了用于绘制频率响应图的分析方法。

该电路称为**低通滤波器**，因为低频信号“通过”该电路后的输出衰减很小，而高频信号通过该电路后输出有显著的衰减(即“不能通过”)。

$$\omega_r:=0,0.01..2.5\quad A_r(\omega_r):=\frac{1}{\sqrt{1+\omega_r^2}}$$



如果将电阻和电容调换位置，则相应的电路称为**高通滤波器**，因为其对低频信号有衰减作用。另外两种有用的滤波器是陷波滤波器和带通滤波器。**陷波滤波器**有时称为带阻滤波器，除了对一个很窄频带内的信号有很高的衰减外，其他所有频率信号均可通过，该滤波器的一个常见用途是消除信号线上经常出现的60Hz干扰。另一方面，带通滤波器允许一个窄频带内的信号通过并显著衰减所有其他频率信号。

4.5 相位线性度

优良测量系统的第三个标准是相位线性度，相位线性度表明系统保持输入信号中各频率分量间相位关系的程度。

考虑图4-8所示的两个信号间相位角和时间轴平移之间的关系，因为信号2在时间轴上滞后出现，信号2在相位上滞后于信号1。两信号间的时间轴平移 t_d 为 $T/4$（T 为信号的周期）。信号的一个周期相当于 2π 弧度或360°，信号1与信号2间的相位角为：

$$\phi = 360t_d/T(°) = 2\pi t_d/T(\text{rad}) \tag{4-27}$$

于是，当 $t_d = T/4$ 时，相位角为90°或 $\pi/2$ 弧度。

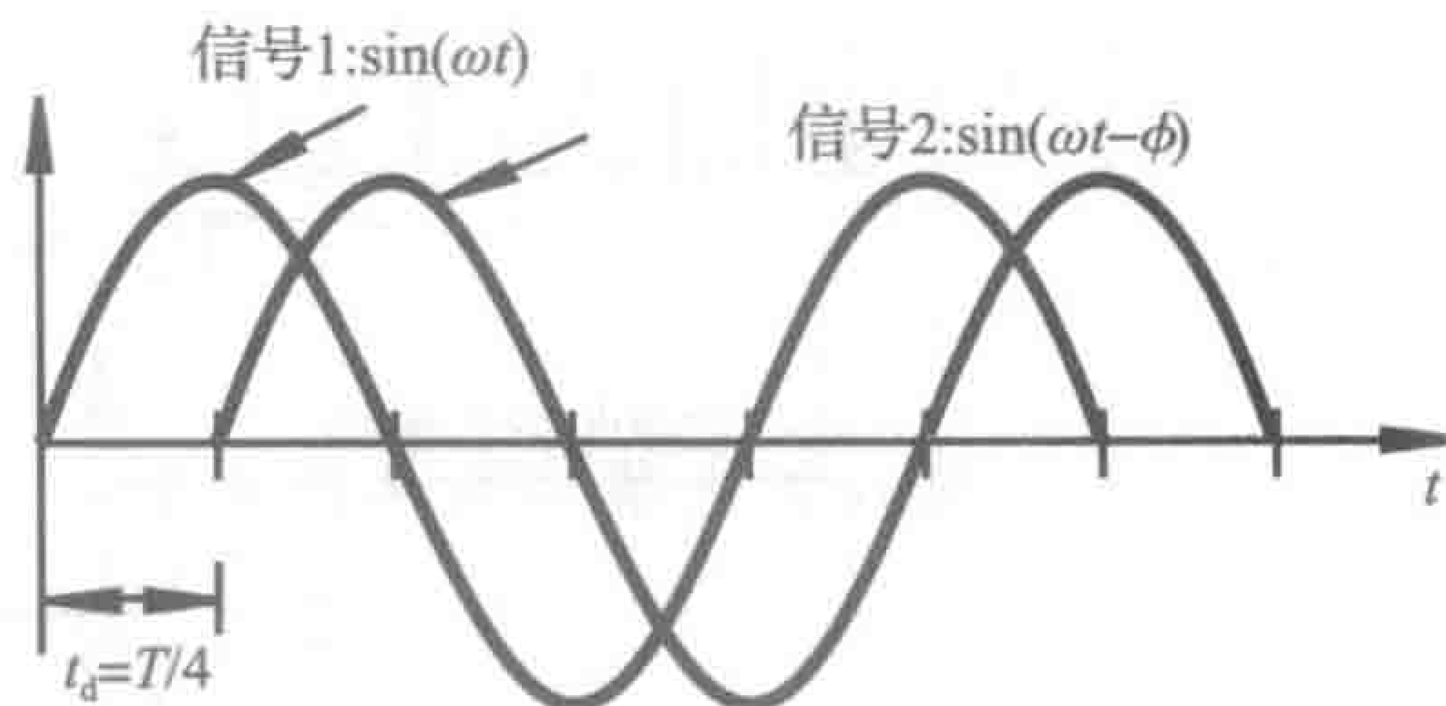


图4-8 相位与时间轴平移之间的关系

测量系统可能会引起输入信号与输出信号间的延时或时间轴平移，对于给定频率 f（$f=1/T$）式(4-27)可以表示为

$$\phi = 360f \cdot t_d(°) = 2\pi f \cdot t_d(\text{rad}) \tag{4-28}$$

因此，对于一给定时间轴平移，信号相位偏移的大小取决于频率，由于信号可以由许多频率分量构成，所以所有的频率分量必须平移相同的时间，这是十分重要的，否则，测量系统的输出将失真。当所有频率分量都平移相同的时间 t_d 时，一定存在下式：

$$\phi = k \cdot f \tag{4-29}$$

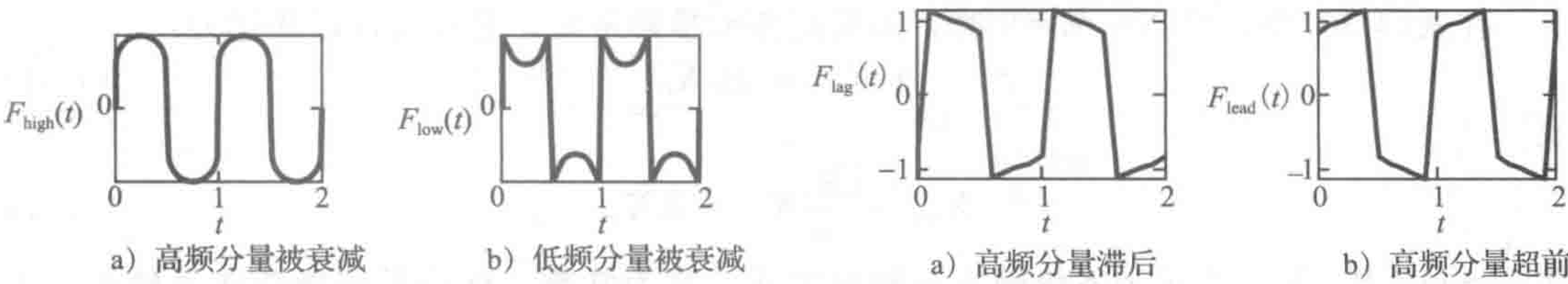
其中，k 为 $360t_d$ 度或 $2\pi t_d$ 弧度的常量。所以，当信号中各频率分量的时间轴平移相等时，相位角一定与频率成线性关系，当系统工作在此状态下，称为**相位线性度**。对测量系统而言，k 一般为负数。这意味着系统记录到的输出滞后于实际的输入信号。

4.6 信号失真

当系统不具有幅值线性度时，系统输出信号中频率分量的幅值将会衰减，如图4-9所示，其结果导致系统在测试方波信号时输出信号会**幅值失真**。在图中，谐波系数包含了幅值随频率的增加而减小图4-9a或增加图4-9b的指数函数，特别要注意输出信号的变化（失真）。MathCAD示例4.3包括用来产生图4-9所示的图形的分析过程。

当一系统不具有相位线性度时，输出信号的频率分量也许有合适的幅值，但是相对于其他频率分量信号而言，时间上会出现平移，如图4-10所示，其结果导致系统在测试方

波信号时输出信号会出现**相位失真**。MathCAD示例4.4包括了用来产生图4-10所示图形的分析过程。



a) 高频分量被衰减 b) 低频分量被衰减

图4-9 方波波形的幅值失真(由MathCAD生成)

a) 高频分量滞后 b) 高频分量超前

图4-10 方波波形的相位失真(由MathCAD生成)

一个高保真度测量系统必须具有幅值线性度以避免出现幅值失真，并且应有足够的带宽以通过输入信号中的所有频率分量以及应具有相位线性度以避免出现相位失真。

在设计或分析测量系统时，我们希望能够预测系统的性能，因此，必须建立系统模型和用数学方式描述其行为，本章后面内容将介绍系统分析工具，使得完成前述工作。

$t := 0, 0.01..2$　　　$n := 1..50$

$B_n := \dfrac{4}{\pi\cdot(2\cdot n-1)}\exp[-0.1(2n-1)]$　　　$C_n := \dfrac{4}{\pi(2n-1)}\{1-\exp[-(2n-1)]\}$

$F_{high}(t) := \sum_n B_n \sin[(2n-1)2\pi t]$　　　$F_{low}(t) := \sum_n C_n \sin[(2n-1)2\pi t]$

$t := 0, 0.01..2$　　　$n := 1..50$

$B_n := \dfrac{4}{\pi(2n-1)}$　　　$dt_n := 0.05\{1-\exp[-(2n-1)]\}$

$F_{lag}(t) := \sum_n B_n \sin[(2n-1)2\pi(t-dt_n)]$　　　$F_{lead}(t) := \sum_n B_n \sin[(2n-1)2\pi(t+dt_n)]$

课堂讨论项目4.3 分析衰减

图4-9采用下面的指数项衰减低频和高频的幅值分量

$$e^{-0.1(2n-1)} \text{ 和 } 1-e^{-(2n-1)}$$

解释这些指数项是如何引起方波失真的。(提示：绘制指数函数并描述它们如何改变方波频谱分量的幅值。)

4.7 系统的动态特性

我们将看到，许多测量系统可以建模为系数线性微分方程：这也适用于许多机电一体化系统或其子系统。这些线性模型一般具有以下形式：

$$\sum_{n=0}^{N} A_n \frac{d^n X_{out}}{dt^n} = \sum_{m=0}^{M} B_m \frac{d^m X_{in}}{dt^m} \tag{4-30}$$

其中，X_{out}是系统的输出变量；X_{in}是系统的输入变量；A_n 和 B_n 是常系数；N 为系统的**阶次**，与 M 无关。这种常用来确定系统微分方程模型的方法依赖于待分析系统的类型，例如，牛顿定律和受力分析图应用于机械系统，KVL 和 KCl 方程应用于电气系统。常系数 A_n 代表待分析系统的物理性质。

许多机电一体化系统具有非线性行为，不能如线性系统一样精确建模，然而，非线性系统在输入信号变化很小时常表现为线性行为，且可以推导出在该范围内能提供足够精度的线性模型，这种非线性系统建立线性模型的过程称为**线性化**。

后续三节主要介绍式(4-30)中描述的最简单和最普通方法，$M=0$ 且 $N=0$、1 或 2。这三种情况分别称为零阶、一阶和二阶系统。

4.8 零阶系统

在式(4-30)中，当 $N=M=0$ 时，该模型表示**零阶**系统，其行为可以描述为：

$$A_0 X_{out} = B_0 X_{in} \tag{4-31}$$

或

$$X_{out} = \frac{B_0}{A_0} X_{in} = K X_{in} \tag{4-32}$$

其中，$K=B_0/A_0$，表示为系统输入与输出之比，其为常数，称为系统**增益**或**灵敏度**。当灵敏度高时，系统输入的较小变化可导致输出产生显著变化。注意：零阶系统的输出精确跟随输入，且没有时间延迟和失真。

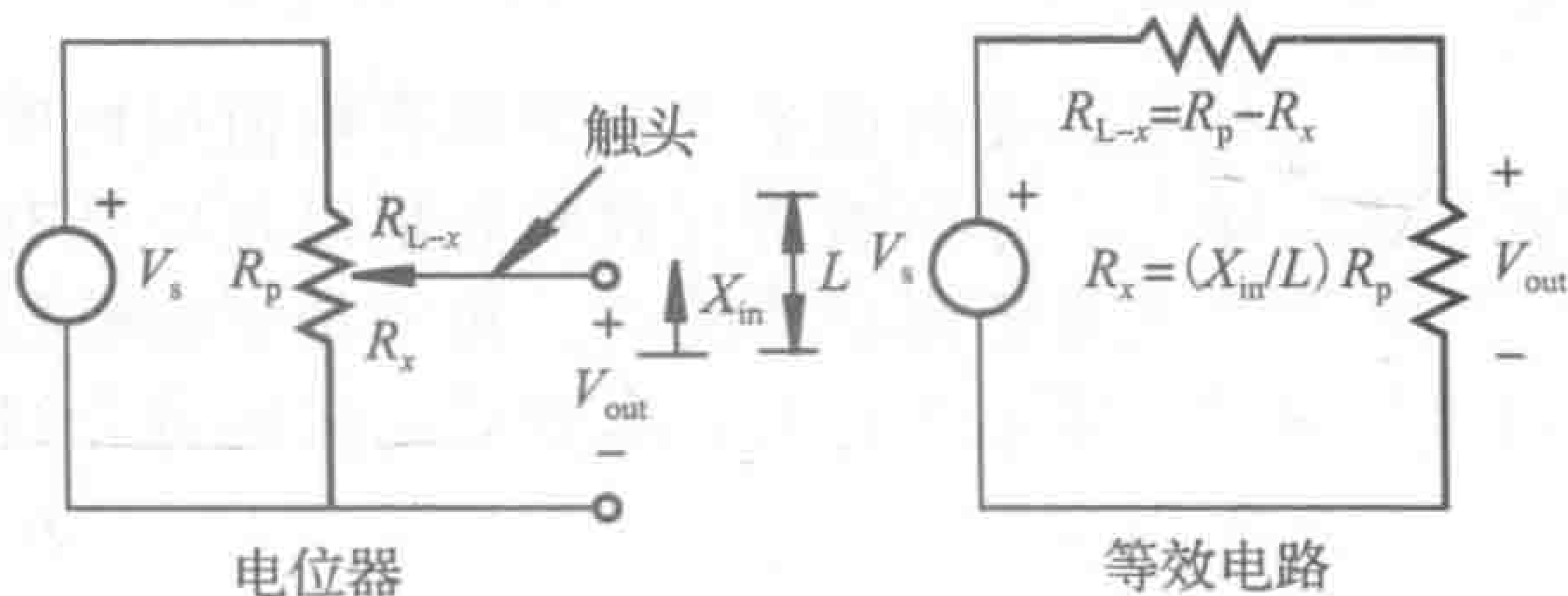


图 4-11 位移电位器

一个零阶测量系统的实例是用于测量位移的电位器。电位器是一个可变电阻，其输出电阻值随着内部触头沿着电阻表面的移动而发生改变。如图 4-11 所示，位移电位器产生与触头位移 X_{in} 直接成正比的输出电压 V_{out}。根据分压定理可知：

$$V_{out} = \frac{R_x}{R_p} V_s = \left(\frac{V_s}{L}\right) X_{in} \tag{4-33}$$

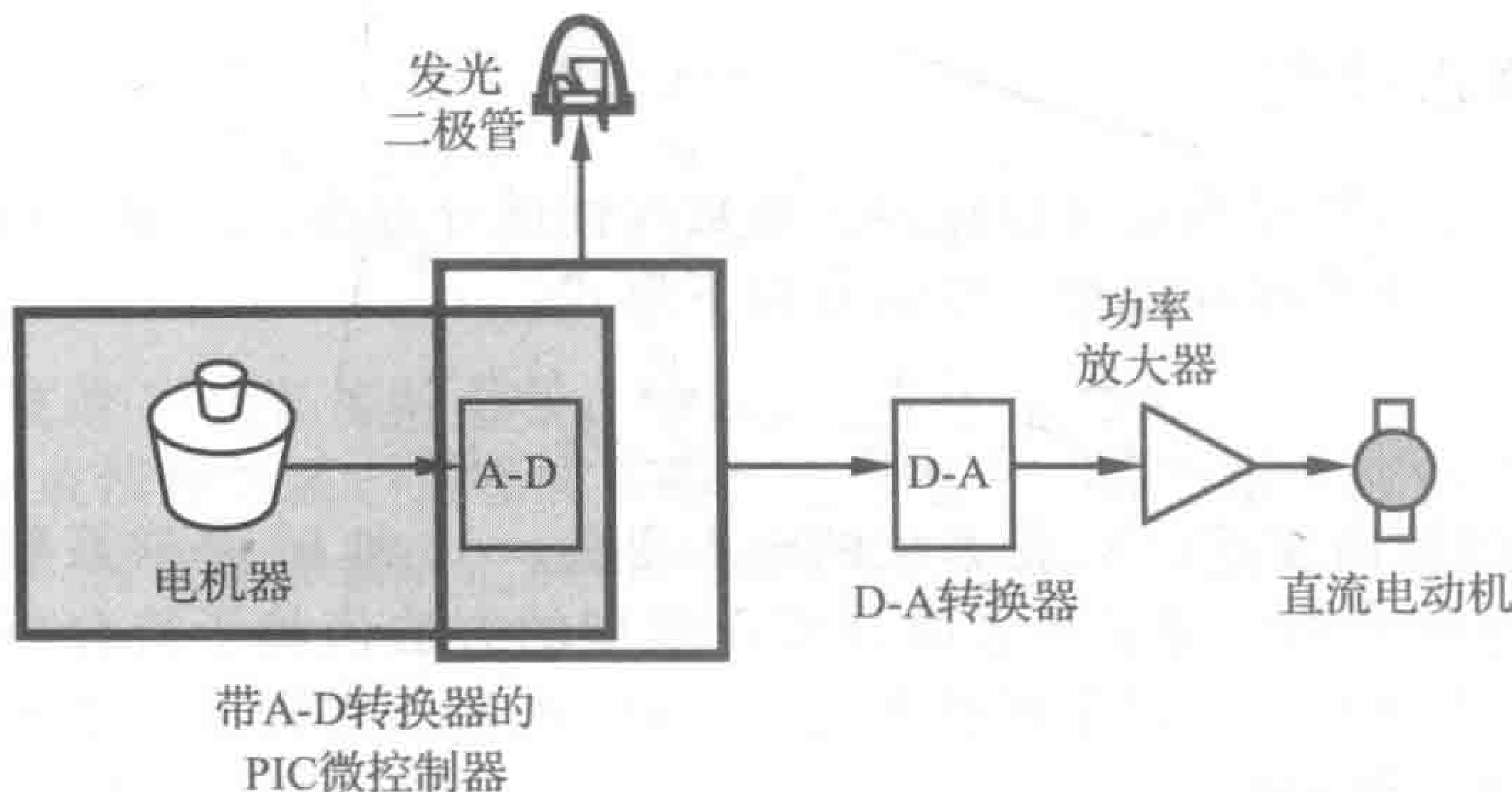
式中，R_x 为电位器两导线间的电阻值；R_p 为电位器的最大电阻值；X_{in} 为电位器触头的位移量；L 为电位器触头的最大位移值。

课堂讨论项目 4.4　　一个零阶电位器

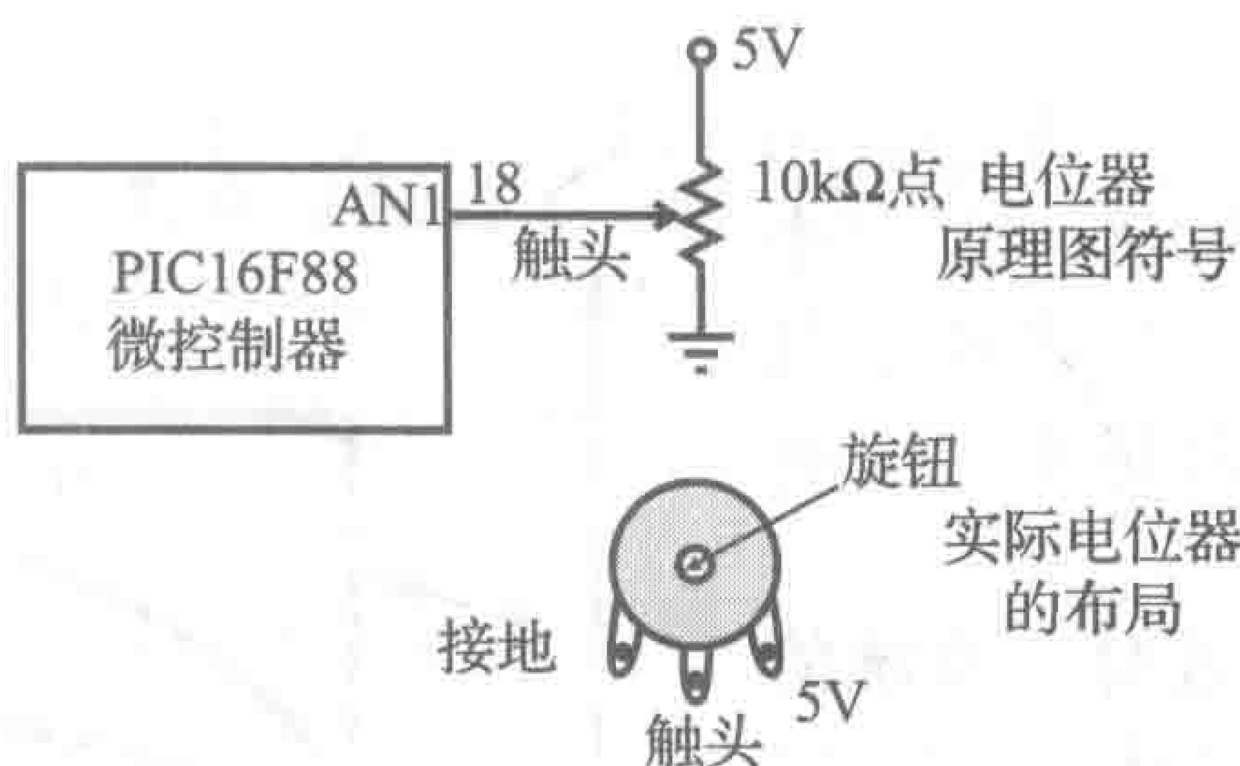
对于此电位器要确保电位器为零级测量系统，需要做出哪些近似假设？

渐进设计实例 A.2　　直流电动机功率运算放大器速度控制器——电位器接口

下图为渐进设计实例 A(参见 1.3 节与视频演示 1.6)的功能框图。



为连接电位器与微控制器，模拟电压输出[参见式(4-30)]必须转换为数字信号。幸运的是，具有内置模-数(A-D)转换功能的 PIC 微控制器可以完成上述转换。这将使 PIC 能够通过下图所示的简单电路检测电位器的位置(电压量)。电位器有 3 根导线，中间触头对应的导线与 PIC 的模拟输入端连接(引脚 18，端口 AN1)。当电位器旋钮转动时，触头导线的电压变化范围为 0～5V。



4.9 一阶系统

在式(4-30)中，当 $N=1$ 且 $M=0$ 时，该模型表示**一阶系统**，其行为可以描述为：

$$A_1 \frac{\mathrm{d}X_{out}}{\mathrm{d}t} + A_0 X_{out} = B_0 X_{in} \tag{4-34}$$

或

$$\frac{A_1}{A_0}\frac{\mathrm{d}X_{out}}{\mathrm{d}t} + X_{out} = \frac{B_0}{A_0}X_{in} \tag{4-35}$$

与零阶系统一样，式(4-35)右边的系数比名为灵敏度，或**静态灵敏度**，定义为：

$$K = \frac{B_0}{A_0} \tag{4-36}$$

式(4-35)左边的系数比有特殊的名称和含义，称为**时间常数**，定义为：

$$\tau = \frac{A_1}{A_0} \tag{4-37}$$

后续分析将说明如此命名的原因。基于上述定义，一阶系统微分方程可以写为：

$$\tau \frac{\mathrm{d}X_{out}}{\mathrm{d}t} + X_{out} = KX_{in} \tag{4-38}$$

注意，在方程的标准形式中，X_{out} 的系数必须为1。

为描述系统对不同形式输入信号的响应，模型采用标准信号作为输入，包括阶跃信号、脉冲信号与正弦信号。**阶跃**信号从0突变到常值 A_{in}，其数学描述如下：

$$X_{in} = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ A_{in}, & t \geqslant 0 \end{cases} \tag{4-39}$$

对阶跃输入信号系统产生的输出称为系统的**阶跃响应**。对于一阶系统，可以利用式(4-39)对式(4-38)求解得到系统的阶跃响应，初始条件如下：

$$X_{out}(0) = 0 \tag{4-40}$$

假设齐次微分方程式(4-38)解的形式为 Ce^{st}，**特征方程**为：

$$\tau s + 1 = 0 \tag{4-41}$$

因为特征方程的根为 $s=-1/\tau$，方程的**齐次解**或**瞬态解**为：

$$X_{out_h} = Ce^{-t/\tau} \tag{4-42}$$

式中，C 为采用初始条件求出的常数。在阶跃输入作用下，方程的**特解**或**稳态解**为：

$$X_{out_p} = KA_{in} \tag{4-43}$$

方程的**通解**是齐次解与特解的和[式(4-42)+式(4-43)]：

$$X_{out}(t) = X_{out_h} + X_{out_p} = Ce^{-t/\tau} + KA_{in} \tag{4-44}$$

该方程应用初始条件[见式(4-40)]可得到：

$$0 = C + KA_{in} \tag{4-45}$$

即，

$$C = -KA_{in} \tag{4-46}$$

则系统的阶跃响应为：

$$X_{out}(t) = KA_{in}(1 - e^{-t/\tau}) \tag{4-47}$$

其响应曲线如图 4-12 所示，为一个趋近 KA_{in} 的指数上升曲线。上升速度仅依赖于时间常数 τ，时间常数越小响应速度越快。

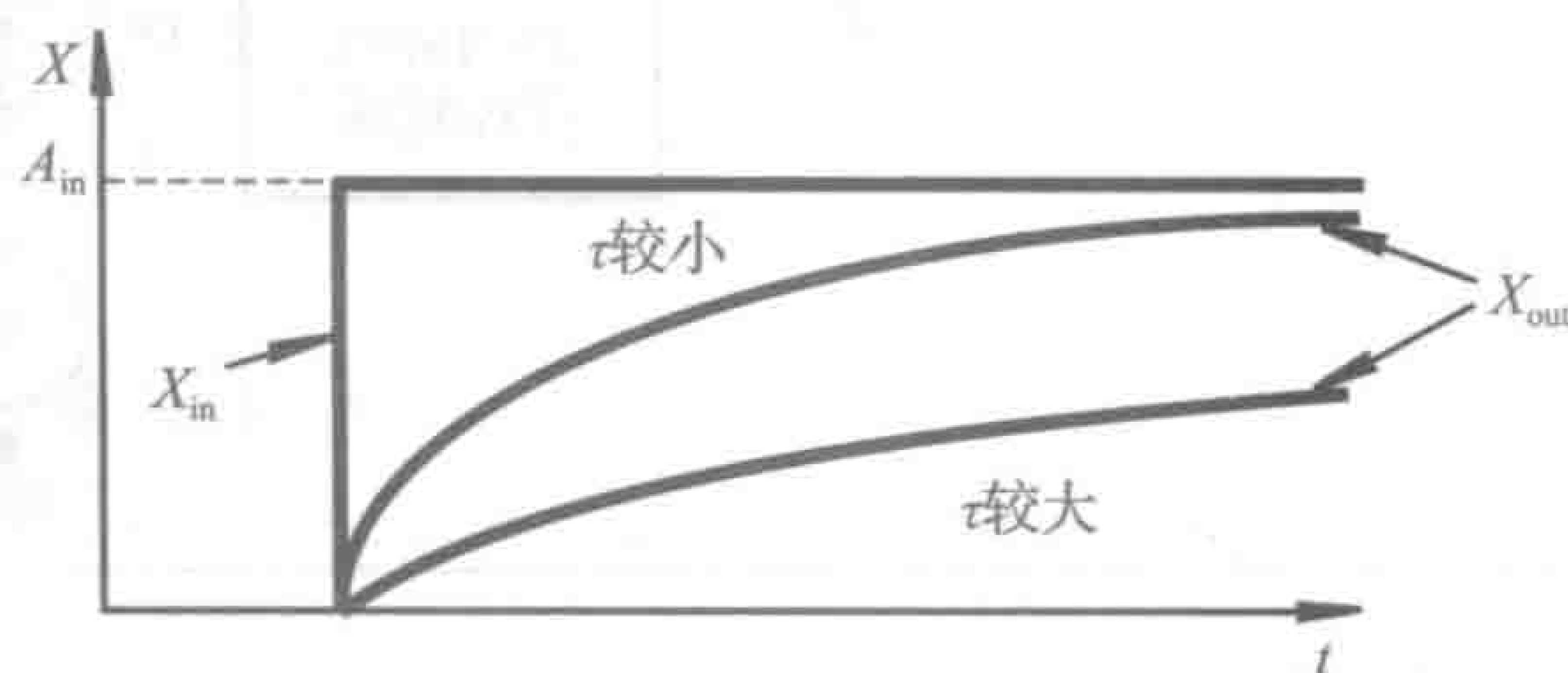


图 4-12　一阶响应

当时间达到 1 倍时间常数时，系统的输出值达到终值的 63.2%。由式(4-46)可知，

$$X_{out}(\tau) = KA_{in}(1 - e^{-1}) = 0.632KA_{in} \tag{4-48}$$

当时间达到 4 倍时间常数时，系统输出为：

$$X_{out}(4\tau) = KA_{in}(1 - e^{-4}) = 0.982KA_{in} \tag{4-49}$$

因为输出值已经超过稳态响应值 KA_{in} 的 98%，所以常常定义一阶系统达到稳态所需的时间为 4 倍时间常数。

在设计一阶测量系统时，观测影响时间常数的各个变量，如果有可能，尽量减小时间常数。时间常数越大，测量系统对输入信号的响应速度越慢。

一阶系统最具代表性的示例是 RC 电路(参见例 4.1)，该电路的时间常数 $\tau=RC$［参见式(4-19)］。RC 电路在定时、滤波及其他应用(例如，例 4.1、6.12.3 节与例 7.6)中十分常见。视频演示 4.9 描述了 RC 电路的阶跃响应，给出了电容两端电压随时间变化的过程。电容的充电与放电时间直接与电路的时间常数相关。

一阶系统的实验验证

为了描述与评估一阶系统，必须通过实验方法确定系统的时间常数 τ 与静态灵敏度 K。静态灵敏度 K 可以通过静态标定确定，给系统施加一个已知的静态输入，观测系统的输出。一种经常用于确定时间常数的方法是：给系统施加一个阶跃输入，通过观测系统输出值达到终值的 63.2%的时间来确定时间常数 τ［参见式(4-48)］。另外一种确定时间常数 τ 的方法如下。

重新整理式(4-47)，表示为：

$$\frac{X_{out} - KA_{in}}{KA_{in}} = -e^{-t/\tau} \tag{4-50}$$

简化得：

$$1 - \frac{X_{out}}{KA_{in}} = e^{-t/\tau} \tag{4-51}$$

等式两边取自然对数，可得：

$$\ln\left(1 - \frac{X_{out}}{KA_{in}}\right) = -\frac{t}{\tau} \tag{4-52}$$

定义等式左边为 Z，则

$$Z = -\frac{t}{\tau} \tag{4-53}$$

且 Z-t 曲线为一直线，斜率为：

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{1}{\tau} \tag{4-54}$$

因此，根据阶跃响应实验数据可以画出图 4-13 所示的 Z-t 曲线图，可根据直线的斜率确定时间常数 τ：

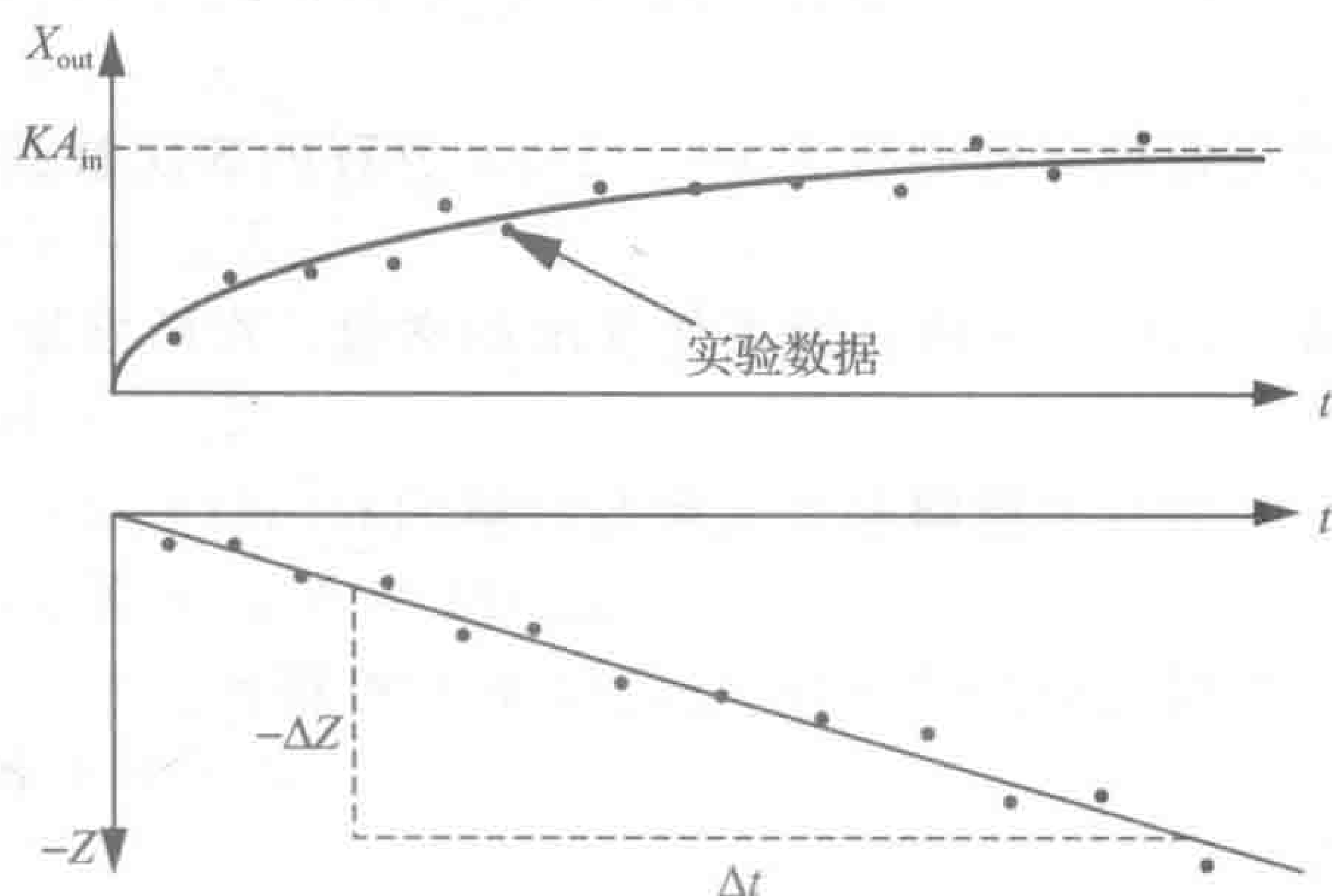


图 4-13　利用实验方法确定时间常数 τ

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\Delta Z} \tag{4-55}$$

需要注意，如果利用实验数据得到的 Z-t 曲线偏离直线，则系统就不为一阶系统，可能为高阶系统或具有非线性性。

4.10 二阶系统

在式(4-30)中，当 $N=2$ 时，系统即为二阶系统。弹簧-质量-阻尼系统是典型的二阶系统，如图4-14所示。应用牛顿运动定律($\sum F_x = ma_x$)进行受力分析可以得到系统的二阶微分方程模型：

$$m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + kx = F_{\mathrm{ext}}(t) \tag{4-56}$$

其中，m 为质量；b 为阻尼系统；k 为弹簧的刚度系数；x 为质量块偏离平衡位置的位移，正方向为图4-14所示的向下方向；$F_{\mathrm{ext}}(t)$表示 x 方向上所有作用于质量块上外力的合力，因为 x 定义为质量块偏离平衡位置的位移，因此受力分析图中没有包括质量块的重力。在平衡位置处，相对未拉伸时，弹簧拉伸 δ 距离，因此质量块的重力影响平衡：$k\delta=mg$。需要注意，弹力(kx)与质量块的位移方向相反，阻力($b\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$)与质量块的速度方向相反。

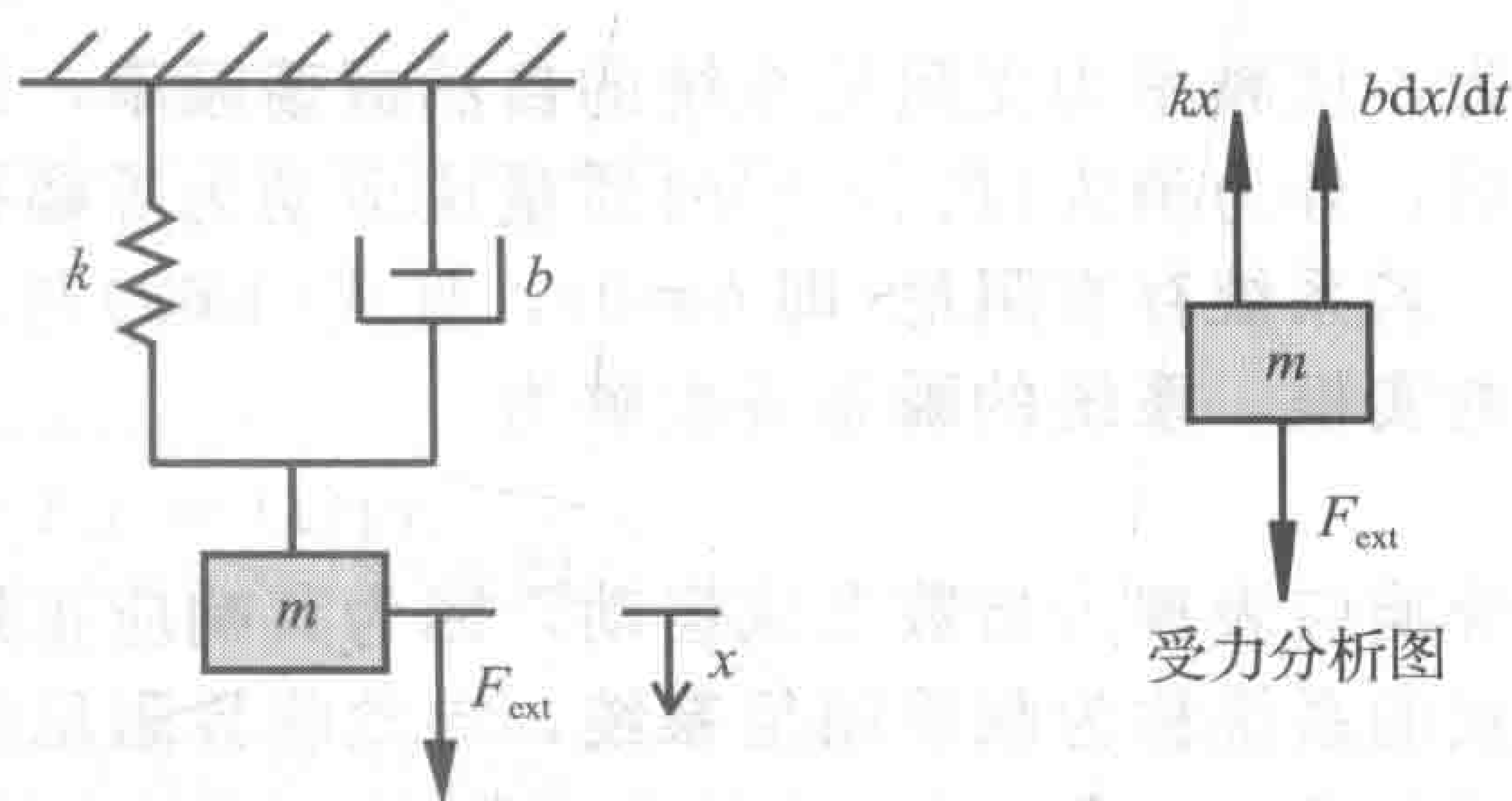


图4-14 二阶机械系统与受力分析图

由后续4.11节可知，除了机械弹簧-质量-阻尼系统外，许多二阶系统(例如，机械旋转系统与液压系统)的控制方程都与式(4-56)有相同的形式。

较合适的二阶测量系统示例是图4-15所示的纸带记录器。纸带记录器包括连续运动的纸卷筒，笔在纸带上前后移动，笔架上连接一根弹簧以保持作用力撤除后笔架位于中间位置。纸带记录器可以看作是机械示波器，在进入数字时代前，由于大量的时变数据需要存储(例如，为了后续分析使用)，所以纸带记录器得到广泛应用，现在仍然应用于一些场合(例如，老的地震仪站与测谎仪)。作用力 F_{ext} 由磁心安装在笔架上的电磁线圈产生。弹簧保证在输入为0的情况下笔架位于零位置，笔架轴承与笔-纸相互作用产生阻力，笔架与笔构成了系统中受外力作用的质量块。

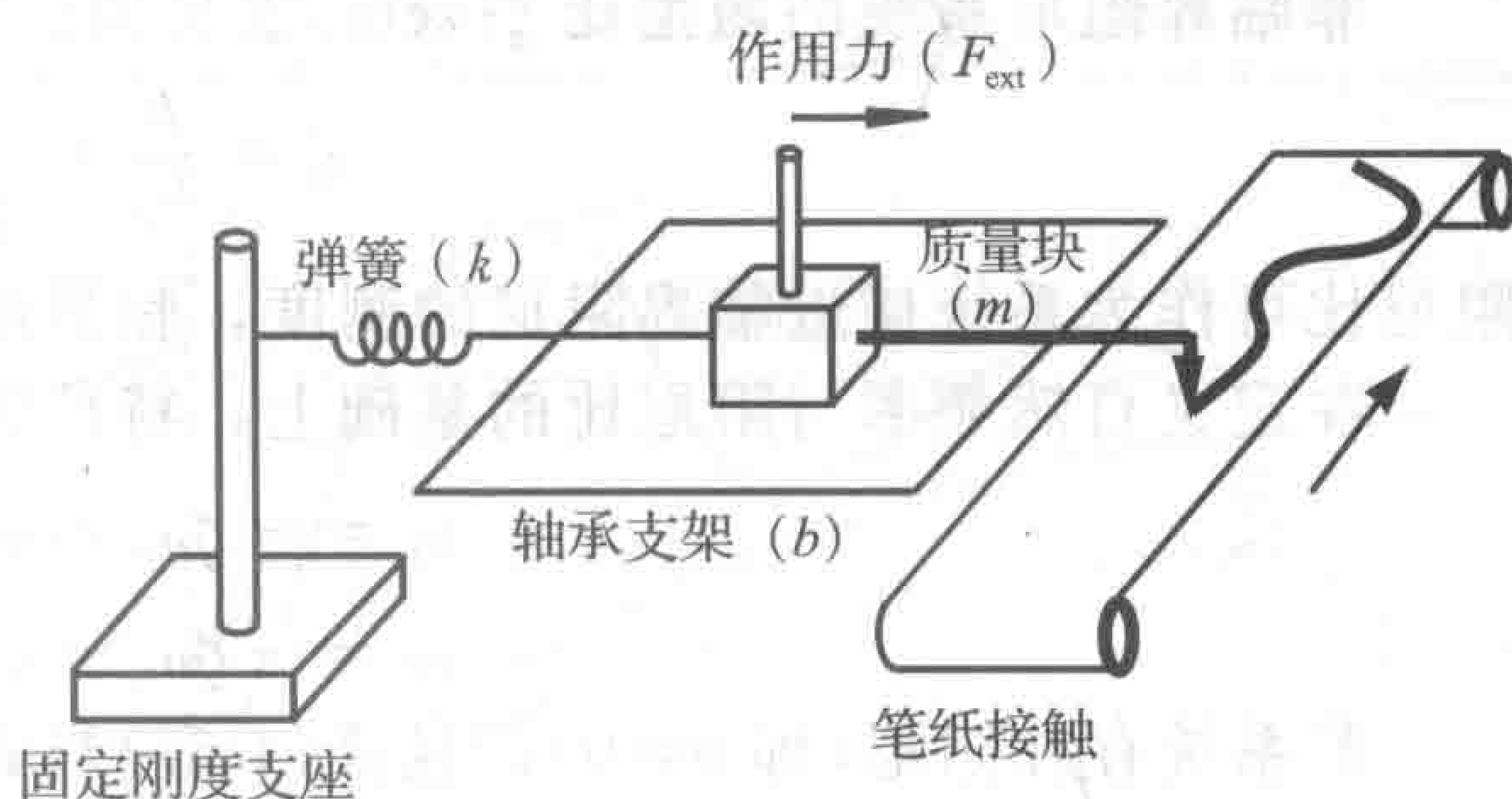


图4-15 二阶系统示例：纸带记录器

为了描述二阶系统的自然响应，在 $F_{\mathrm{ext}}=0$ 时，对式(4-56)中的微分方程进行求解，特征方程为：

$$ms^2 + bs + k = 0 \tag{4-57}$$

该二次方程有两个根：

$$s_1 = -\frac{b}{2m} + \sqrt{\left(\frac{b}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \tag{4-58}$$

$$s_2 = -\frac{b}{2m} - \sqrt{\left(\frac{b}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \tag{4-59}$$

若系统为无阻尼系统(即 $b=0$)，方程的根为：

$$s_1 = \mathrm{j}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4-60}$$

$$s_2 = -\mathrm{j}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4-61}$$

相应的齐次解为：

$$x_{\mathrm{h}}(t) = A\cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) + B\sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \tag{4-62}$$

其中，A 与 B 为常数，由初始条件 $x(0)$ 与 $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t(0)$ 来确定。系统运动表示为**无阻尼**等幅振荡运动，其角频率为：

$$\omega_{\mathrm{n}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4-63}$$

因为，该频率为无阻尼系统的**自然振荡频率**，即当弹簧受到外力拉伸时质量块偏离平衡位置后，外力消失($F_{\mathrm{ext}}=0$)时质量块运动为等幅振荡，ω_n 称为系统的自然频率。

若系统存在阻尼(即 $b\neq 0$)，且式(4-58)与式(4-59)的被开方数为 0，方程根为两个相同的实根，系统的瞬态齐次解为

$$x_{\mathrm{h}}(t) = (A + Bt)\mathrm{e}^{-\omega_{\mathrm{n}}t} \tag{4-64}$$

系统响应表现为指数衰减运动，因为其响应正好临界于阻尼振荡运动，所以具有这种响应形式的系统称为**临界阻尼系统**，导致临界阻尼的阻尼系数称为**临界阻尼系数** b_{c}，数值上等于式(4-58)与式(4-59)中被开方数为 0 时对应的阻尼系数 b，即：

$$b_{\mathrm{c}} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_{\mathrm{n}} \tag{4-65}$$

非临界阻尼系统的**阻尼比** ζ(zeta)定义为：

$$\zeta = \frac{b}{b_{\mathrm{c}}} = \frac{b}{2\sqrt{km}} \tag{4-66}$$

阻尼比可作为系统接近临界阻尼的测度，临界阻尼系统的阻尼比为 1。

在定义自然频率与阻尼比的基础上，特征方程[见式(4-58)与式(4-59)]的根可以写成：

$$s_1 = -\zeta\omega_{\mathrm{n}} + \omega_{\mathrm{n}}\sqrt{\zeta^2 - 1} \tag{4-67}$$

$$s_2 = -\zeta\omega_{\mathrm{n}} - \omega_{\mathrm{n}}\sqrt{\zeta^2 - 1} \tag{4-68}$$

若系统存在阻尼(即 $b\neq 0$)，且式(4-67)与式(4-68)的被开方数为负数(即 $\zeta<1$)，则方程的根为一对共轭复根，系统的瞬态齐次解为：

$$x_{\mathrm{h}}(t) = \mathrm{e}^{-\zeta\omega_{\mathrm{n}}t}\left[A\cos(\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2}t) + B\sin(\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2}t)\right] \tag{4-69}$$

系统响应表现为阻尼振荡衰减运动，包括幅值呈指数衰减的正弦运动。由于其阻尼比小于临界阻尼($\zeta<1$)，所以具有该种响应形式的系统称为**欠阻尼系统**，振荡频率为：

$$\omega_{\mathrm{d}} = \omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2} \tag{4-70}$$

也称为系统**阻尼自然频率**。

若系统存在阻尼(即 $b\neq 0$)，且式(4-67)与式(4-68)的被开方数为正数(即 $\zeta>1$)，方程的根为两个互不相同的实根，系统的瞬态齐次解为：

$$x_{\mathrm{h}}(t) = A\mathrm{e}^{(-\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_{\mathrm{n}}t} + B\mathrm{e}^{(-\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_{\mathrm{n}}t} \tag{4-71}$$

系统响应表现为指数衰减运动。由于其阻尼比大于临界阻尼($\zeta>1$)，所以具有该种响应形式的系统称为**过阻尼系统**。

在上述三种情况(欠阻尼、临界阻尼与过阻尼)下系统瞬态响应的示例如图 4-16 所示。图中曲线表示初始静止状态[$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t(0)$]与 $x(0)=1$ 时外力作用消失后二阶系统在不同阻尼比下的自由响应。

基于上述定义，二阶系统微分方程的另外一种标准形式可以写为：

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{\omega_n^2}{k} F_{ext} \tag{4-72}$$

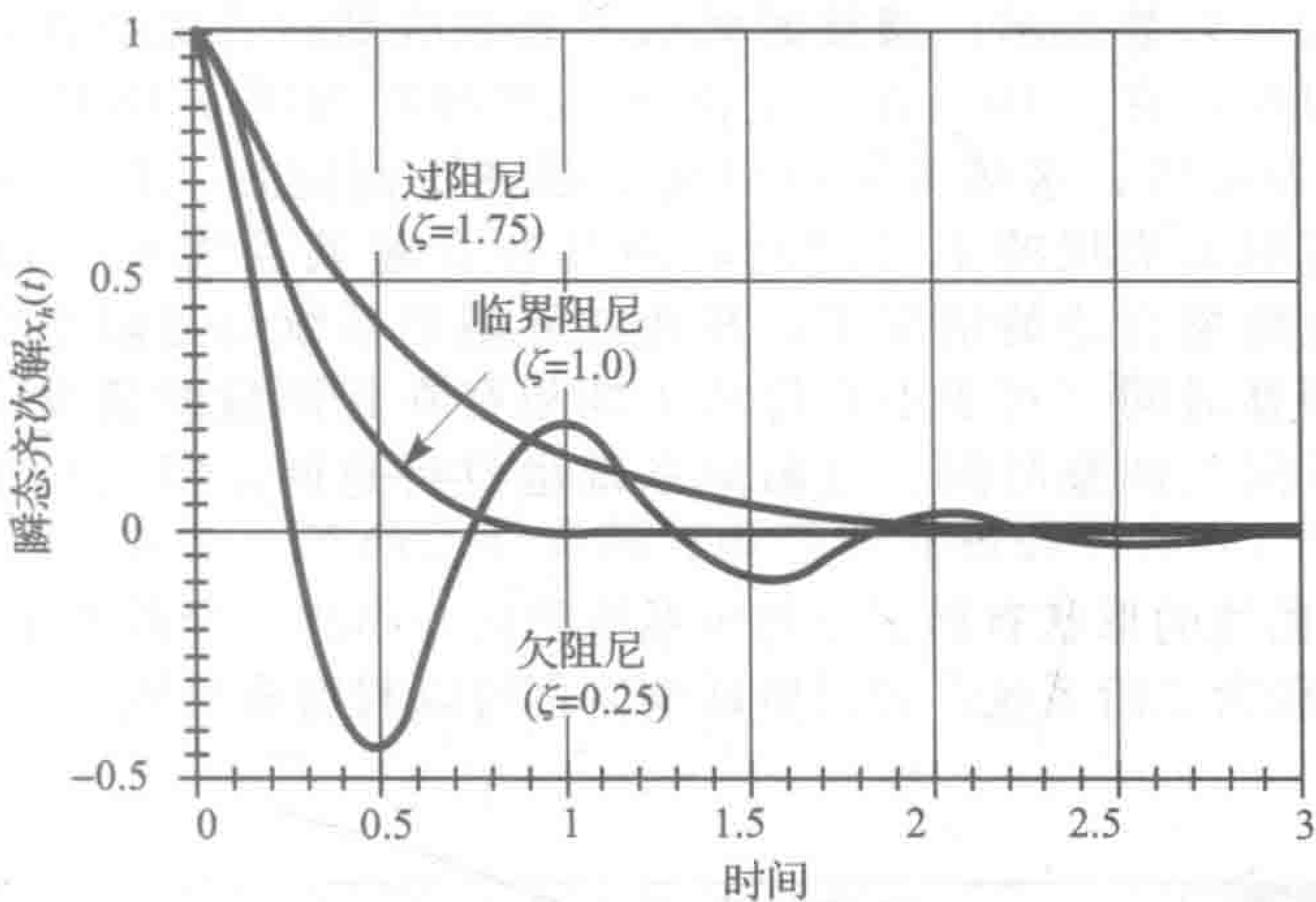


图 4-16 二阶系统的瞬态响应

式(4-63)与式(4-66)定义了式(4-72)中变量与式(4-56)中系数之间的关系。

课堂讨论项目 4.5 太空中的弹簧-质量-阻尼系统

弹簧-质量-阻尼系统的响应在绕地球飞行的空间站中与在地球表面有何差异？为什么？在绕地球飞行的空间站中如何用一根弹簧测量宇航员的质量？

4.10.1 二阶系统的阶跃响应

在分析一阶系统时可以发现，用于研究系统动态特性的重要输入信号是阶跃信号。阶跃响应可以很好地衡量在输入突变响应时系统的快速性与平稳性。阶跃响应包括两部分：4.10 节给出的自然响应对应的瞬态齐次解 $x_h(t)$，以及外力作用下的稳态特解 $x_p(t)$。一阶跃信号定义如下：

$$F_{ext}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ F_i, & t \geqslant 0 \end{cases} \tag{4-73}$$

由式(4-56)可得到特解：

$$x_p(t) = \frac{F_i}{k} \tag{4-74}$$

则阶跃响应的通解为：

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \tag{4-75}$$

式中，$x_h(t)$中的常量取决于系统输入初始状态 $x(0)$与 $dx/dt(0)$，在无外力作用情况下，依据阻尼比的不同，系统响应包括与其对应的 3 种不同响应形式，如图 4-17 所示。

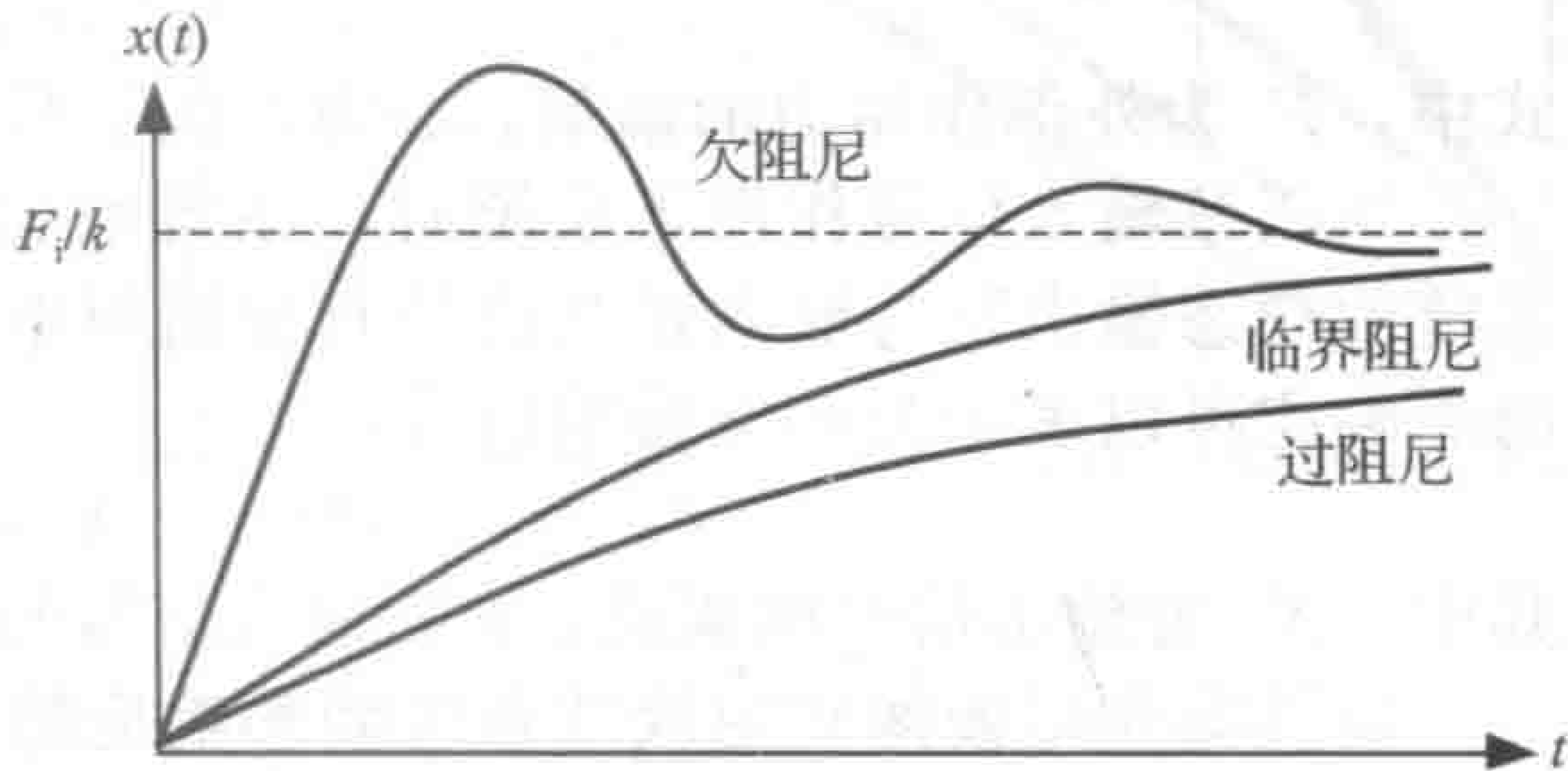


图 4-17 二阶系统的阶跃响应

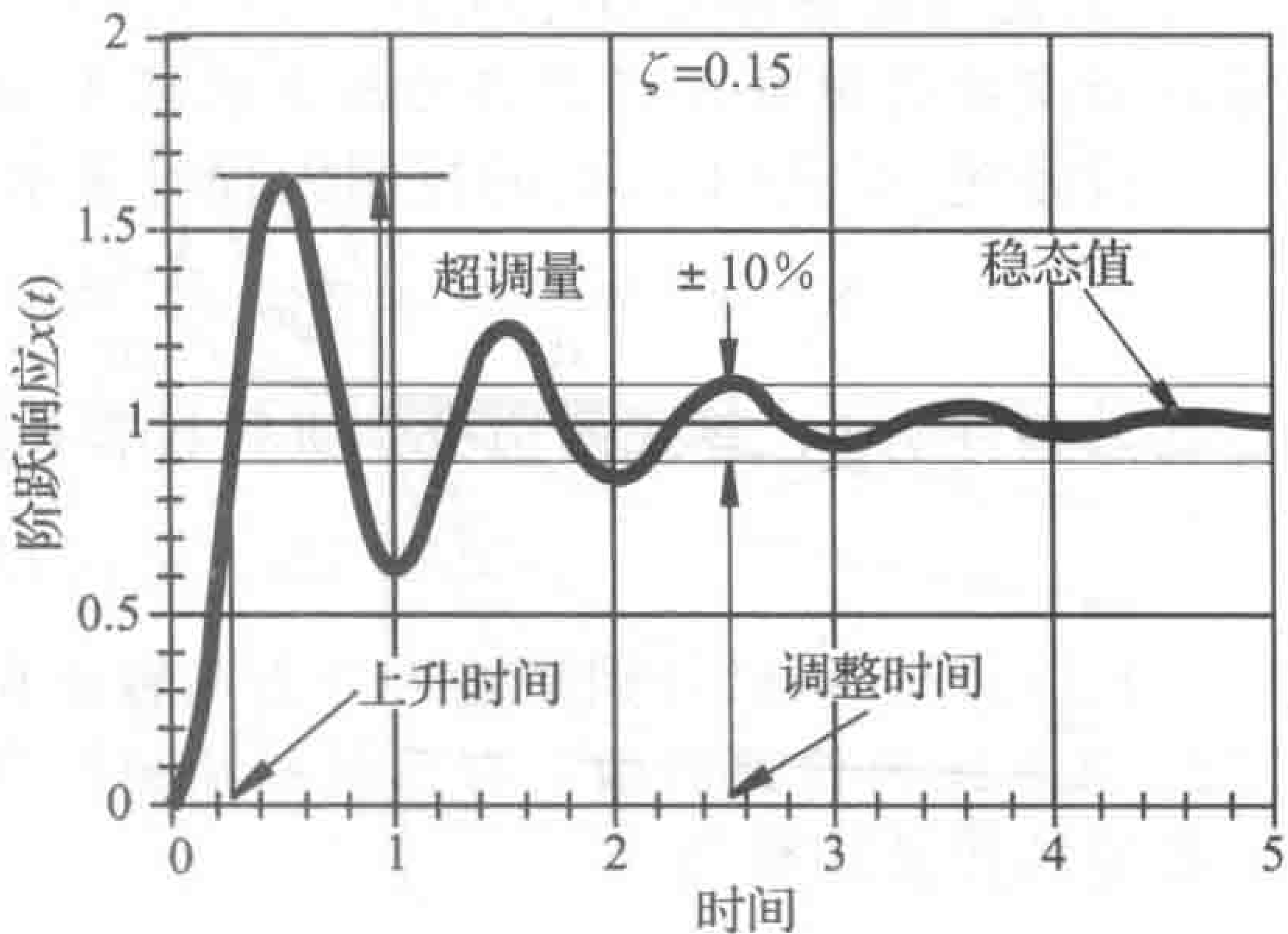


图 4-18 欠阻尼二阶系统的阶跃响应特征

欠阻尼系统的阶跃响应以及描述阶跃响应的相关术语如图 4-18 所示。稳态

值为系统所有瞬态响应消失后达到的终止值，**上升时间**指系统响应从稳态值的10%上升到稳态值的90%所需的时间，**超调量**指系统响应进入稳态前超过稳态输出值的量，常用稳态值的百分数表示。**调整时间**指系统响应到达并保持在稳态值某百分比范围内所需的最短时间，在±10%容许范围下调整时间如图4-18所示，一般在计算调整时间时±2%更为常用。这些指标可以用于描述不同阻尼比的二阶系统的阶跃响应特性：欠阻尼系统具有更快的上升时间，但其存在超调且需要一段时间才能调整结束，然而，在系统阻尼合适的情况下，相比临界阻尼系统与过阻尼系统，欠阻尼系统可以获得较短的调整时间。对于不允许或不期望存在超调量的情况下，临界阻尼系统具有更短的上升时间与调整时间。过阻尼系统也没有超调，但是其上升时间与调整时间一般较长。

由于系统响应曲线的形状有助于分辨出系统阶次，因此，阶跃响应可以用于确定系统阶次。同样，若系统为二阶系统，通过阶跃响应也可以判别该系统是欠阻尼、过阻尼或者临界阻尼系统。

课堂讨论项目 4.6　更优的测量系统响应

描述并绘制你认为在测量系统中什么样的阶跃响应是“好”的阶跃响应，其超调量是否合适？该系统有哪些优点？临界阻尼能不能提供最佳响应？

4.10.2 系统的频率响应

为确定线性系统的频率响应，应在系统上施加正弦输入信号，从而确定系统对于不同频率的正弦信号的输出响应。对于4.10节中描述的二阶系统，作为输入信号的正弦作用力可以表示为：

$$F_{ext}(t)=F_i\sin(\omega t) \tag{4-76}$$

式中，F_i 为外部作用力的幅值；ω 为正弦信号的频率。

当正弦输入信号作用于系统时，系统输出包括瞬态与稳态响应。当瞬态响应消失后，系统的稳态输出是与输入正弦信号有相同频率的正弦信号，但是幅值与相位不同。系统的稳态响应可以表示为如下通用形式：

$$x(t)=X_0\sin(\omega t+\phi) \tag{4-77}$$

其中，X_0 为输出信号的幅值；ϕ 为输入信号与输出信号的相位差。

后续将介绍如何确定线性系统频率响应的过程。线性系统可以用于建模测量系统或通用的各阶机电系统，建模过程以通用形式给出并可应用于二阶系统中。

确定系统频率响应的分析过程

1. 假设初始条件为0：$x(0)=\mathrm{d}x/\mathrm{d}t(0)=0$，求出系统的微分方程的拉普拉斯变换。拉普拉斯变换将微分方程变换为与系统频率响应相关的代数方程。

二阶系统[见式(4-72)]的控制方程可表示为

$$\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2}+2\zeta\omega_n\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t}+\omega_n^2x(t)=\frac{\omega_n^2}{k}F_{ext}(t) \tag{4-78}$$

假设初始条件为0，等式两边分别进行拉普拉斯变换，可得：

$$(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)X(s)=\frac{\omega_n^2}{k}F_{ext}(s) \tag{4-79}$$

式中，$F_{ext}(s)$与$X(s)$分别是输入外力与输出位移的拉普拉斯变换。

2. 求系统的**传递函数**，即系统的输出拉普拉斯变换与输入拉普拉斯变换的比值。

系统的传递函数为：

$$G(s)=\frac{X(s)}{F_{ext}(s)}=\frac{\frac{\omega_n^2}{k}}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \tag{4-80}$$

3. 为了模拟谐波输入，用 jω 代替传递函数中的 s，该步骤服从于系统的频率响应行为。

对二阶系统而言，用 jω 代替式(4-80)中的 s，分子与分母同时除 ω_n^2，可得

$$G(j\omega)=\frac{\frac{1}{k}}{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]+j\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \tag{4-81}$$

4. 计算复数域传递函数的模，求输出信号与输入信号的**幅值比**：

$$\text{mag}[G(j\omega)]=|G(j\omega)| \tag{4-82}$$

对于二阶系统，计算分母的模，即实部与虚部平方和的平方根，移动 k 至等式的左边，可得如下无量纲比值：

$$\frac{X_0}{F_i/k}=\frac{1}{\left\{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]+j\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^{1/2}} \tag{4-83}$$

5. 计算复数域传递函数的幅角，求输出信号与输入信号间的**相位差** ϕ：

$$\phi=\arg[G(j\omega)]=\angle G(j\omega) \tag{4-84}$$

根据式(4-81)可知，复数的幅角是其虚部与实部比值的反正切函数，一个分式的幅角是其分子幅角与分母幅角之差，二阶系统的相位可表示为：

$$\begin{aligned}\phi&=0-\arctan\left\{\frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]}\right\}\\&=-\arctan\left\{\frac{2\zeta}{\frac{\omega_n}{\omega}-\frac{\omega}{\omega_n}}\right\}\end{aligned} \tag{4-85}$$

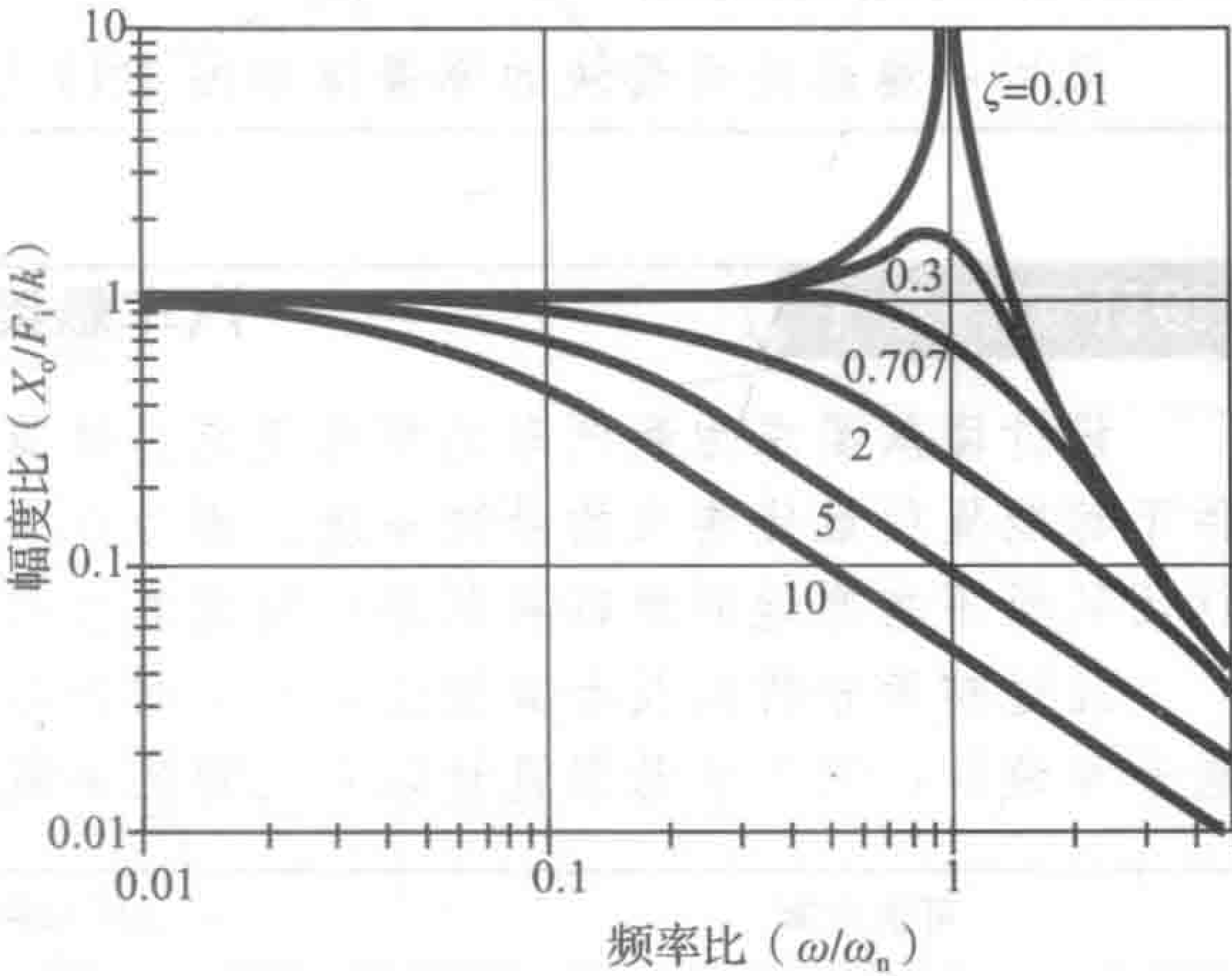


图 4-19 二阶系统的幅值响应

不同阻尼比 ζ 的二阶系统的频率响应函数，如图 4-19 所示。MathCAD 示例 4.5 包括求取频率响应图的分析过程。当输入信号的频率 ω 等于系统自然频率 ω_n（即 $\omega/\omega_n=1$）时，会发生**共振**，ω_n 常称为共振频率。当阻尼比很小时，在谐振点，输出信号幅值变得十分大。当输入信号的频率小于自然频率(即 $\omega/\omega_n<1$)时，幅值比近似等于 1。对一个好的测量系统，一般要求测试信号在期望的频率范围内幅值比接近常数(±3dB 范围内)。当阻尼比为 0.707 时，系统在最大带宽上可得到最优的幅值线性度。

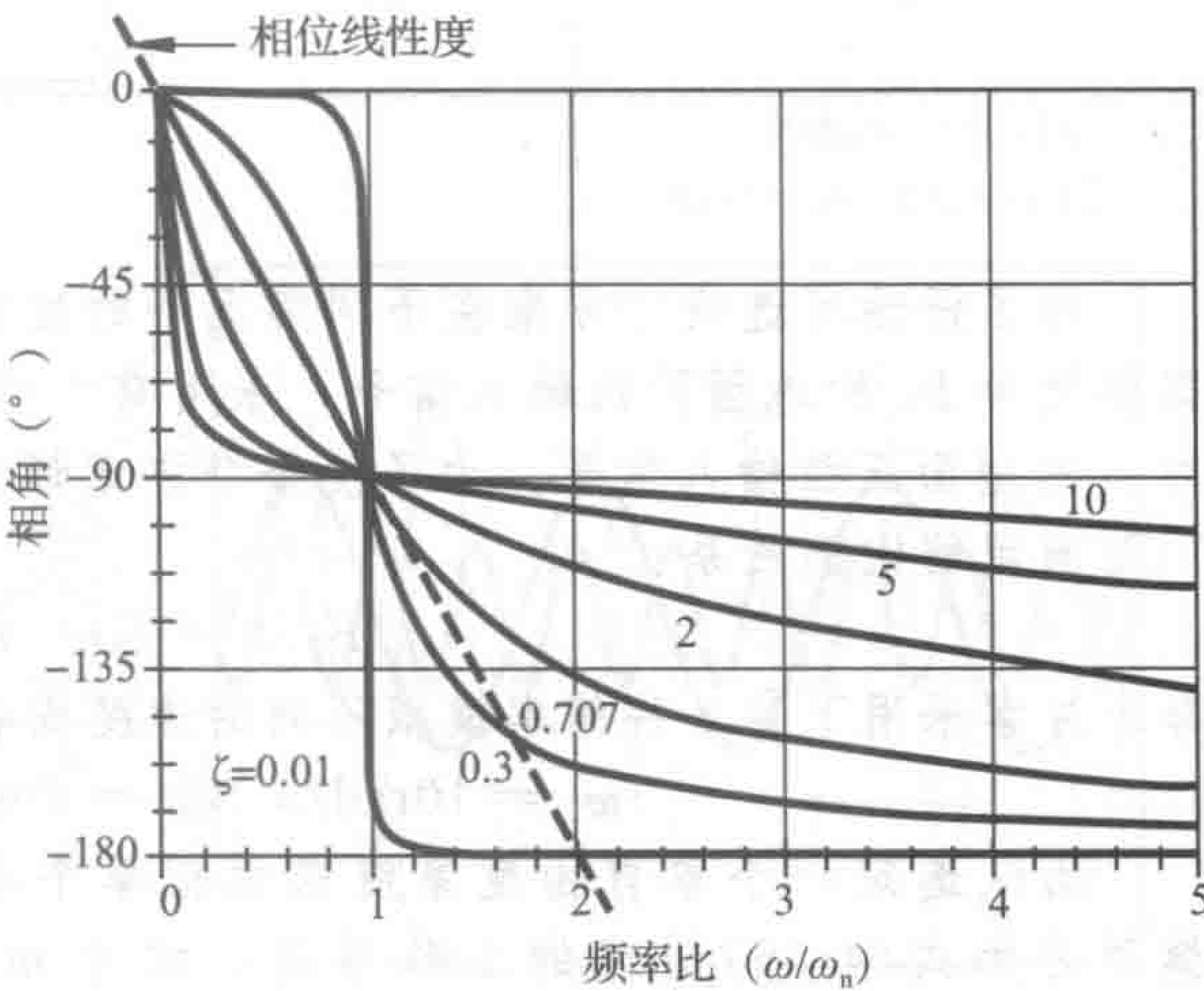


图 4-20 二阶系统的相位响应

频率比与阻尼比函数的相位图如图 4-20 所示。相位角为负表明系统输出的相位滞后输入信号，其值范围为 0°～180°，0°表示没有相位差，180°表示存在半个周期的相位差。当 ω 等于自然频率 ω_n 时(即 $\omega/\omega_n=1$)，输出信号滞后输入信号 90°(四分之一周期)。当系统阻尼非

常小(如 $\zeta=0.01$)且激励频率正好通过自然频率(ω_n)，相位会出现 180°的突变。阻尼比为 0.707 时，能够为二阶系统提供最优的相位线性度。

大多数机械系统可以近似成二阶线性常微分方程。同样，复杂系统或其部件的子系统经一次近似分析后常简化为二阶系统。因此，所有工程师都必须完全理解图 4-19 与图 4-20 所代表的含义。视频演示 4.10～视频演示 4.12 给出了二阶系统响应的概念如何应用于一些基本系统中的例子。视频演示 4.13 给出了一个工程师未能牢固理解这些概念而导致失败的典型案例。在这个视频中，存在对由风引起的振荡载荷理解不全面以及阻尼不合适的情况，而导致悬索桥发生突变失效。

二阶系统响应的幅值与相位一定与输入信号的幅值与相位存在差异。在设计测量系统时，应尽量减小这种差异，因为在较宽的频率范围内系统的幅值线性度与相位线性度都能获得最好的性能，所以阻尼比为 0.707 是最优的选择。在设计其他类型的系统时(如参见设计实例 4.1，关于汽车悬架的设计)，阻尼比为 0.707 可能更适合。

总之，只要周期信号作用于二阶系统，共振、衰减与相移都有可能发生。为了能预测系统如何响应，确定系统的频率响应特性是十分重要的。

课堂讨论项目 4.7　弹簧的频率响应

采用一端悬挂质量块的弹簧演示图 4-19 与图 4-20 给出的频率响应特性。

设计实例 4.1　汽车悬架的选择

设计团队要求为新汽车的前悬架选择弹簧与减振器，团队的任务是选择在各种道路条件下都能提供最优响应的悬挂系统。因为许多美国制造商一直用英制单位来说明产品，设计团队很不情愿地同意以英制单位完成其所有分析。

经过初步分析以及与其他团队开会讨论后，负责悬挂的团队将方案选择限制为 3 种可选悬架设计，这三种悬架设计以下列弹性系数 k 与阻尼常数 b 为特征参数：

可选方案	k/lbf①/in②	b/lbf · s/in
1	500	10
2	200	20
3	120	10

①1lbf=4.44822N

②1in=0.0254m

为了评估可选设计方案在不同路况下的性能，设计团队决定采用凸起或坑槽路面来模拟幅值为 F_0 的地面阶跃输入信号，采用有规律的凸起或波状路面来模拟幅值为 B_0 与频率为 ω 的地面正弦输入信号。为了使每个方案都有相似的输入位移水平，在方案比较时使用下列固定的比例关系：

$$F_0/k = 6\text{in} \quad B_0/k = 3\text{in}$$

每个方案采用下列 3 种频率模拟不同的速度或者凸起间距：

$$\omega_1 = 10\text{rad/s} \quad \omega_2 = 20\text{rad/s} \quad \omega_3 = 30\text{rad/s}$$

团队选定一个单自由度系统来模拟单个车轮，并且忽略其他车轮的响应。最终的模型是如式(4-56)描述的二阶系统，式中 m 为悬架的簧上质量，F_{ext} 为地面作用力。整车重量为 2000lbf，因此，单个车轮的簧上质量假设为整个质量的 1/4：

$$m = 500\text{lbm} = 15.53\text{slugs}$$

注意：1lbm＝0.4536kg；1slugs＝14.593 903kg。车轮质量与轮胎动力学系统不包括在这个简化模型中(参见课堂讨论项目 4.8)。

采用式(4-63)与式(4-66)计算每个方案对应的自然频率 ω_n 与阻尼比 ζ：

可选方案	ω_n	ζ
1	19.6	0.20
2	12.4	0.62
3	9.6	0.40

因为各方案中都有 $\zeta<1.0$，所以悬架表现为如式(4-69)所示的欠阻尼阶跃响应。

阶跃响应与正弦响应的分析在 MathCAD 中完成(参见 MathCAD 示例 4.6)。输入变量定义为：

$$k := 500\,\frac{\text{lbf}}{\text{in}} \qquad b := 10\text{lbf}\,\frac{\text{s}}{\text{in}} \qquad m := 500\text{lb}(1\text{lb} = 0.453\,592\,37\text{kg})$$

$$F_0 := (6\text{in})k \qquad B_0 := (3\text{in})k$$

$$\omega_1 := 10\,\frac{\text{rad/s}}{\text{s}} \qquad \omega_2 := 20\,\frac{\text{rad/s}}{\text{s}} \qquad \omega_3 := 30\,\frac{\text{rad/s}}{\text{s}}$$

$$k := 0\text{s}, 0.01\text{s}..2\text{s}$$

阶跃响应定义为[参见式(4-28)]：

$$\omega_n := \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \zeta := \frac{b}{2\sqrt{km}} \qquad \omega_d := \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$x(t) := \frac{F_0}{k}\left[1 - e^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t)\right]$$

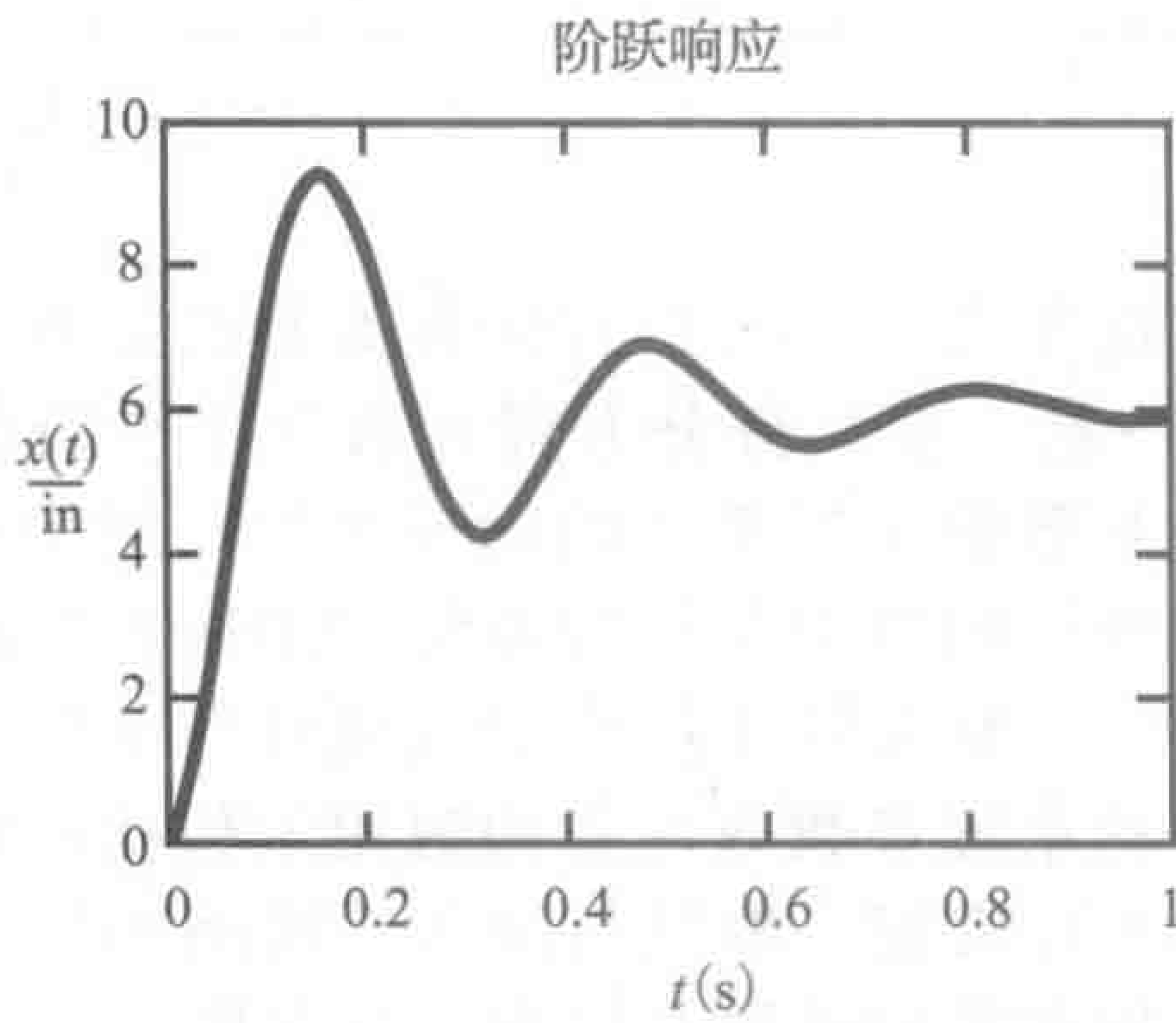
正弦响应定义为：

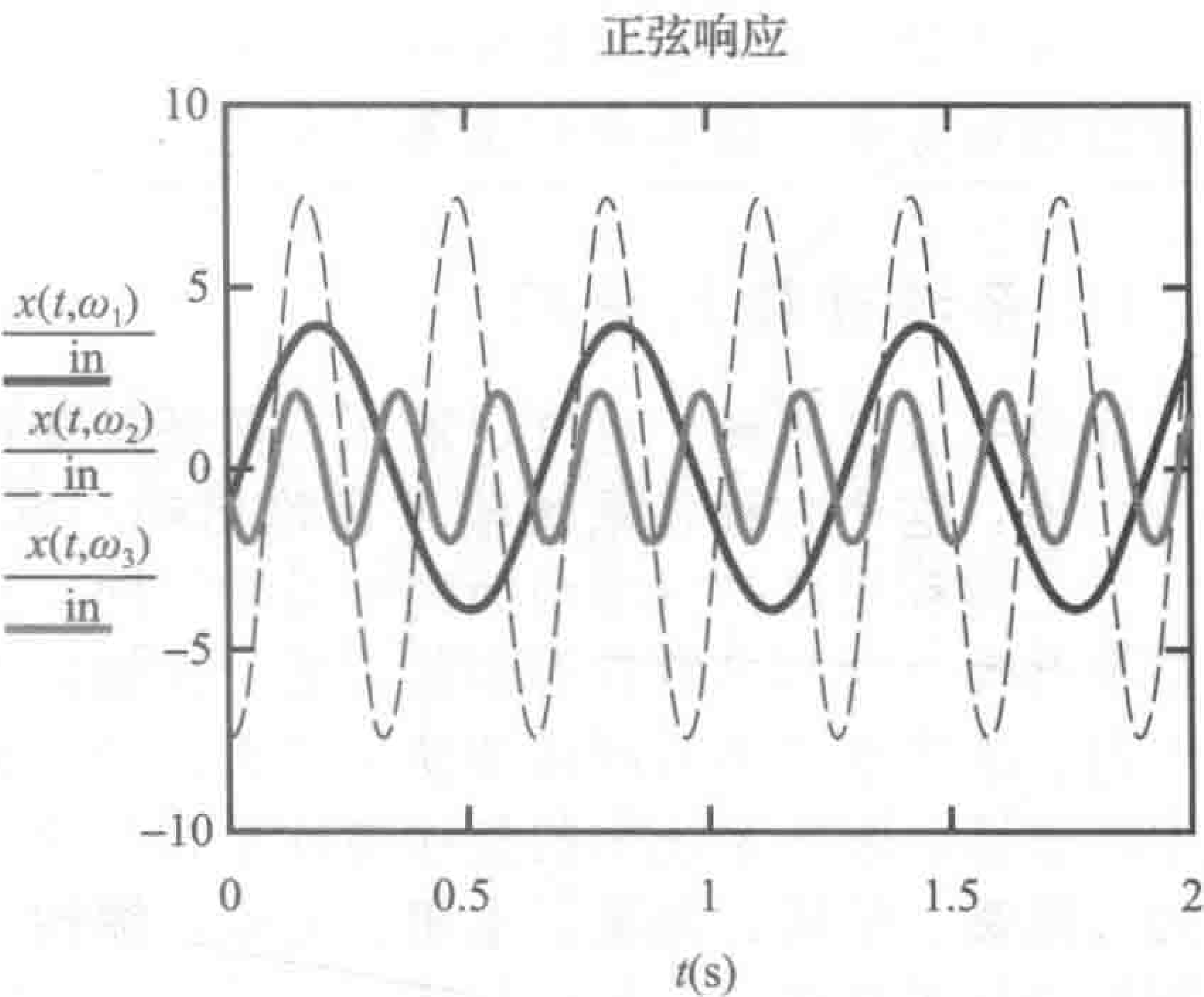
$$X_0(\omega) := \frac{\dfrac{B_0}{k}}{\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2\left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\phi(\omega) := -\text{ang}\left[\left(\frac{\omega_n}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_n}\right), 2\zeta\right]$$

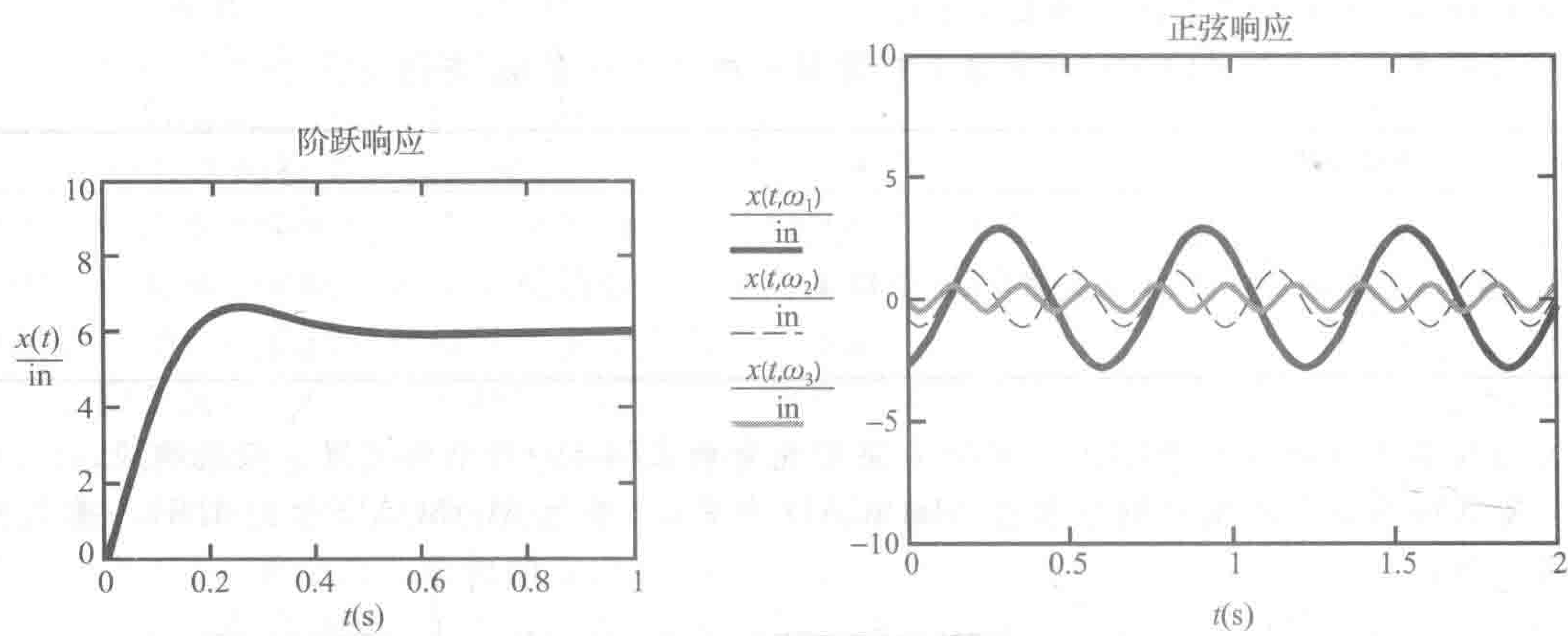
3 种可选方案的分析结果如下：

● 方案 1

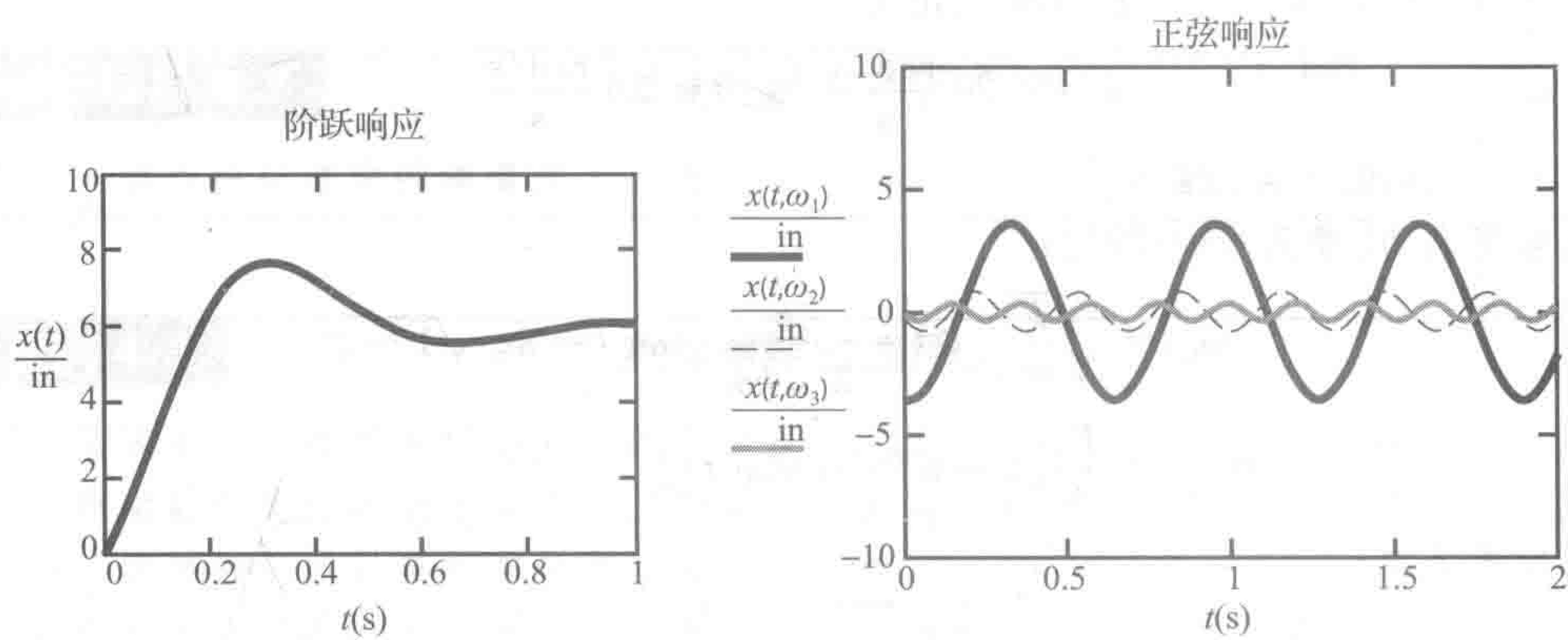




● 方案 2



● 方案 3



一个好的悬架应具有快的响应速度(调整时间短)、良好的操作性能，防止过冲(振荡)或大位移的特点，这能够提高乘客的舒适度。从前述分析结果可知，方案 2 显然是 3 种设计方案中最优的，它的阶跃响应速度快、超调小且正弦响应幅值小。

课堂讨论项目 4.8　　**汽车悬架的设计**

为得到 3 种方案的分析结论，是否需要绘制系统的阶跃响应与正弦响应图？另外，为什么方案 3 的正弦响应信号幅值超过方案 1 但小于方案 2？如果在系统建模中考虑车轮质量与轮胎动力学，模型中还需要增加哪些设计？

4.11　系统建模与分析

无论系统是机械、电气、液压、热还是多种形式的组合，都可以利用常系数微分方程进行建模，这个方程将系统输入和输出响应联系在一起。这些微分方程在数学上十分相似，仅是方程中各微分项前面的常系数不同。这些常系数表示了系统的物理参数，对于不同系统种类，这些参数具有相似关系。例如，电气系统中的电阻与机械系统中的减振器或阻尼器、液压系统中的阀或节流阀是相似的。类似地，机械系统中的质量或惯性与电气系统中的电感、液压系统中的流体惯性是相似的。相似的系统参数或变量的通用量包括：**作用力、流量、位移、动量、电阻、电容、惯性**。表 4-1 对机械、电气与液压系统间相似的通用量进行了总结。此外还包括各种系统中与能量存储和能量耗散变量相关的方程。

表 4-1　二阶系统模型相似性

通用量	机械传动	机械旋转	电气	液压
作用力(E)	力(F)	转矩(T)	电压(V)	压力(P)
流量(F)	速度(v)	角速度(ω)	电流(i)	容积流率(Q)
位移(q)	位移(x)	角位移(θ)	电荷(q)	容积($\forall$)
动量(p)	线动量($p=mv$)	角动量($h=J\omega$)	磁链($I=N\Phi=Li$)	动量/面积($\Gamma=IQ$)
电阻(R)	阻尼(b)	旋转阻尼(B)	电阻(R)	电阻(R)
电容(C)	弹簧($1/k$)	扭簧($1/k$)	电容(C)	容器(C)
惯性(I)	质量(m)	转动惯量(J)	电感(L)	惯量(I)
惯性储能(特例)	$F=\dot{p}(F=ma)$	$T=\dot{h}(T=J\alpha)$	$V=\dot{\lambda}(V=L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)$	$P=\dot{\Gamma}(P=I\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t)$
电容储能	$F=kx$	$T=k\theta$	$V=(1/C)q$	$P=(1/C)\forall$
耗能	$F=bv$	$T=B\omega$	$V=Ri$	$P=RQ$

因为液压系统中的电阻通常不是常数，所以其成为表中唯一有疑问的相似量。它通常是关于流速和几何尺寸的非线性函数。相似性也可以扩展应用到其他物理现象中，如热传导，其中温差是“作用力”，热流是“流量”，传热量是“位移”，与质量和比热对应的热容是“电容”，与对流和传导对应的热阻是“电阻”。然而，热传导和其他许多物理现象无法利用二阶线性微分方程建立合适的模型，所以表中给出的关系没有直接的相似性。

图 4-21 描述了一个电气、机械与液压系统的控制方程及其相似性的示例。每个系统由具有相同形式的微分方程来描述，唯一的差别是描述相似元器件的参数。一个系统中的任意参数与其他两个系统中各自对应的参数存在直接相似性。例如，电气系统中的电容与机械系统中的弹簧、液压系统中的容器是相似的，流过电容的电流($I_2=I_1-I_3$)与弹簧的压缩速度($v_2=v_1-v_3$)、液压系统中流入容器的流速($Q_2=Q_1-Q_3$)是相似的。

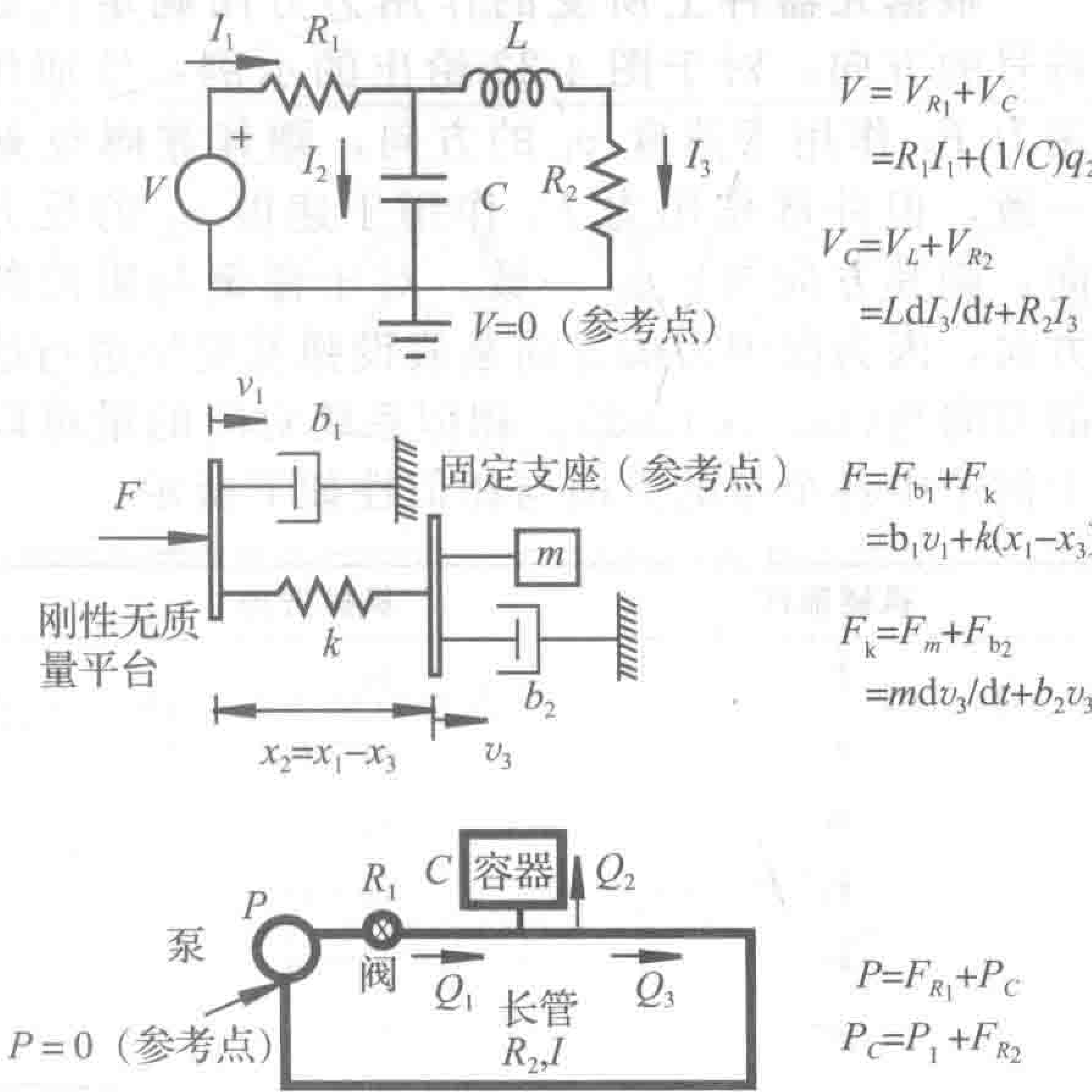


图 4-21　相似系统示例

相似的概念能够帮助我们更加深入理解与直观感知不同系统是如何响应的，它还可以提供一种建模框架和采用通用形式分析各种各样的系统。若掌握了一种系统特性与分析方法，则可以直接将其应用于其他系统中。

过去，在数字计算机出现前，模型相似性是应用模拟计算机进行仿真与分析各种类型系统行为的基础。其过程是开发一个与感兴趣的物理系统相似的电气系统。在模拟计算机的帮助下建立相似的电气系统，提供比例、积分、微分、混合以及其他功能。通过提供电压信号形式的输入产生的电压或电流输出完成仿真，这个输出与仿真物理系统感兴趣量是相似的。作为一个例子，图 4-21 所示的机械系统行为可以通过构建图中所示的电路进行研究，在该电路中，$C=s/k$，$R_1=s\cdot b_1$，$R_2=s\cdot b_2$ 及 $L=s\cdot m$，式中，s 为常系数比例因子。对于受到外力 $F(t)$作用的质量块 m，施加电压 $V(t)=s\cdot F(t)$作用于电路并且监测流过电感的电流与电感两端的电压，预测其作用力与运动速度将成为一个

简单的问题。根据经验可知，在实际机械系统中质量块的受力为 $F_m=(V_L/s)$，速度为 $v_m=(I_L/s)$。在数字计算机上数字积分仿真软件可用之前，这是仿真复杂物理系统行为的唯一方法。

课堂讨论项目 4.9　　初始条件相似量

与机械系统中弹簧初始位移对应的电气相似量是什么？换句话说，电气系统中对应的初始条件是什么？

下面的过程帮助我们将以一种形式描述的系统转换为以其他形式描述的相似系统。作为一个说明示例，图 4-22 所示的机械系统转换为与之相似的电气系统。

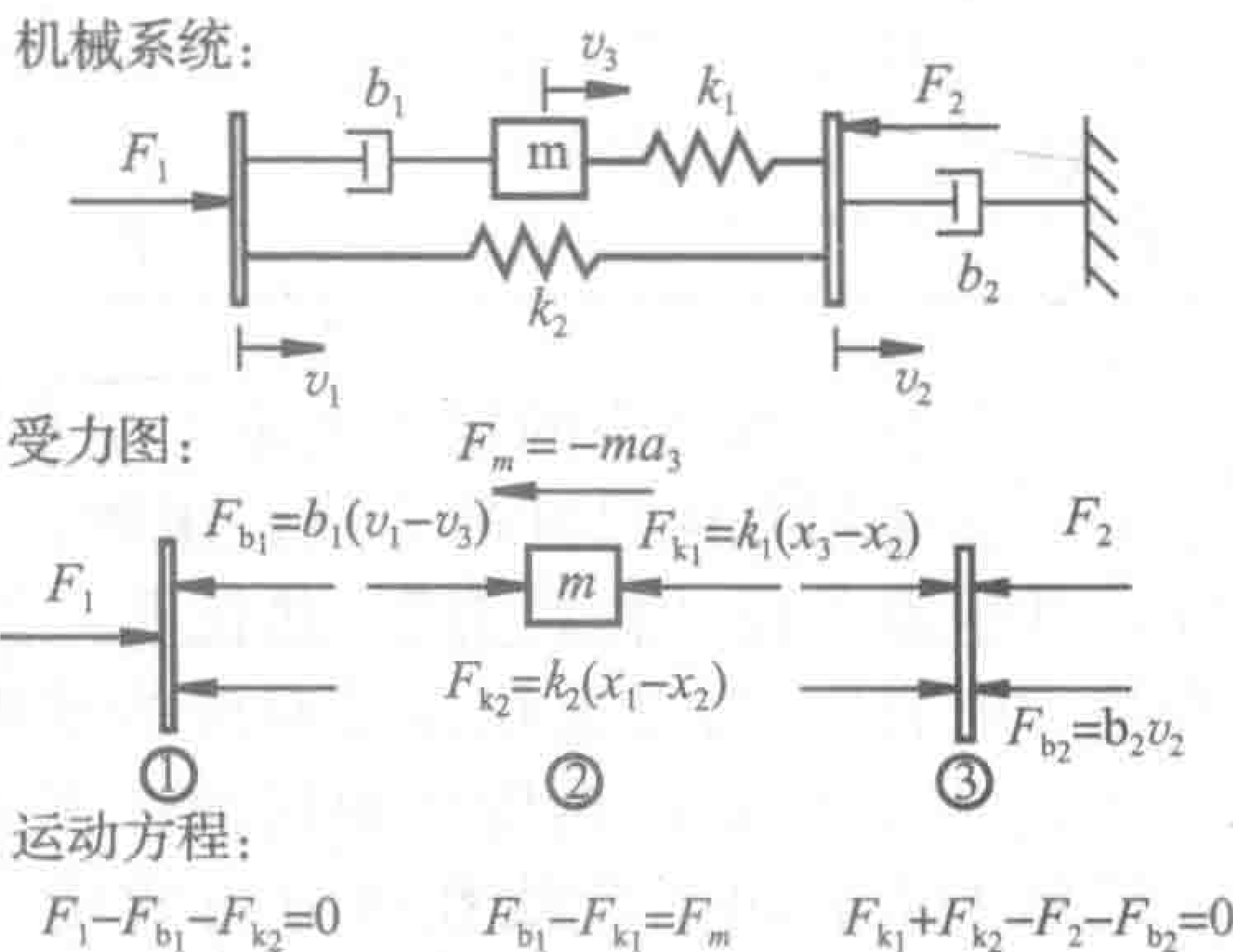


图 4-22　机械系统中相似量的示例

将一个系统转换为相似系统的步骤

1. 为系统中每个元器件及其相似量标注合适的符号与方向。

根据元器件上所受的作用力方向确定代数符号的方向，对于图 4-22 给出的示例，外加作用力 F_1 作用于速度 v_1 的方向，则其方向与 v_1 一致，但外部作用力 F_2 作用于速度 v_2 的反方向，则其方向与 $-v_2$ 一致。对于弹簧与阻尼的方向，因为图中力的方向是假设弹簧受压进行绘制的，所以 b_1 的方向与 (v_1-v_3) 一致，k_1 的方向与 (v_3-v_2) 一致。相似系统对应的量可以根据表 4-1 直接替换对应的量而获得。整个例子中各个量的方向与相似性如下所示。

机械部件	机械方向	电气方向	电气元器件
F_1	v_1	I_1	V_1
b_1	v_1-v_3	I_1-I_3	R_1
m	v_3	I_3	L
k_1	v_3-v_2	I_3-I_2	C_1
k_2	v_1-v_2	I_1-I_2	C_2
b_2	v_2	I_2	R_2
F_2	$-v_2$	$-I_2$	V_2

2. 基于机械系统运动方程($\sum F=ma$)或电气系统 KVL 回路方程列出每个节点的系统方程。

例如，参见图 4-22 所示的受力图与系统方程。注意对于无质量的刚性平台，因为这些平台的质量假设可忽略不计，所以系统方程为 $\sum F=0$。对于质量块 m，方程式为 $\sum F=ma$。或者，采用另外一种方式，惯性项(ma)可以认为是图 4-22 所示的惯性力($F_m=-ma$)。在这种情况下，系统方程仍然为 $\sum F=0$。

3. 根据系统标注的各元器件方向，选择一个元器件开始构建相似的原理图，虽然任何元器件都能满足构建需求，但最好从系统内部的元器件开始(即该变量的方向影响其他很多元器件)。

图 4-23 给出了如何开始绘制原理图，从电感 L 开始，递归扩展至涉及该电感方向(I_3)的其他元器件。注意在构建原理图时需要建立受力图或 KVL 方程以及元器件方向关系。

4. 校验带有相似系统方程的图形。

例如，KVL 回路方程实际上与受力图形的运动方程具有相同的形式(参见图 4-22 与图 4-24)。

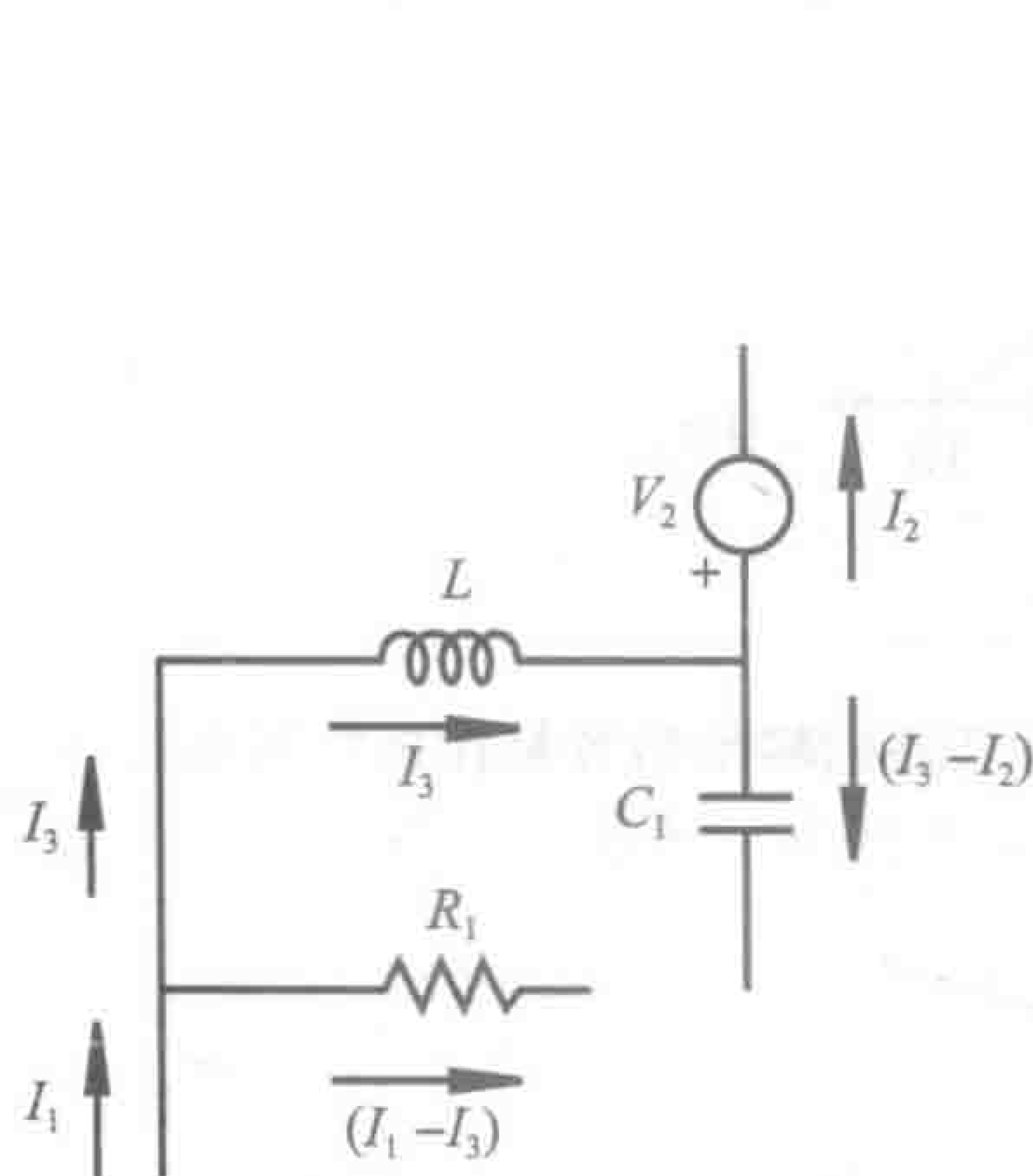


图 4-23 创建相似的原理图

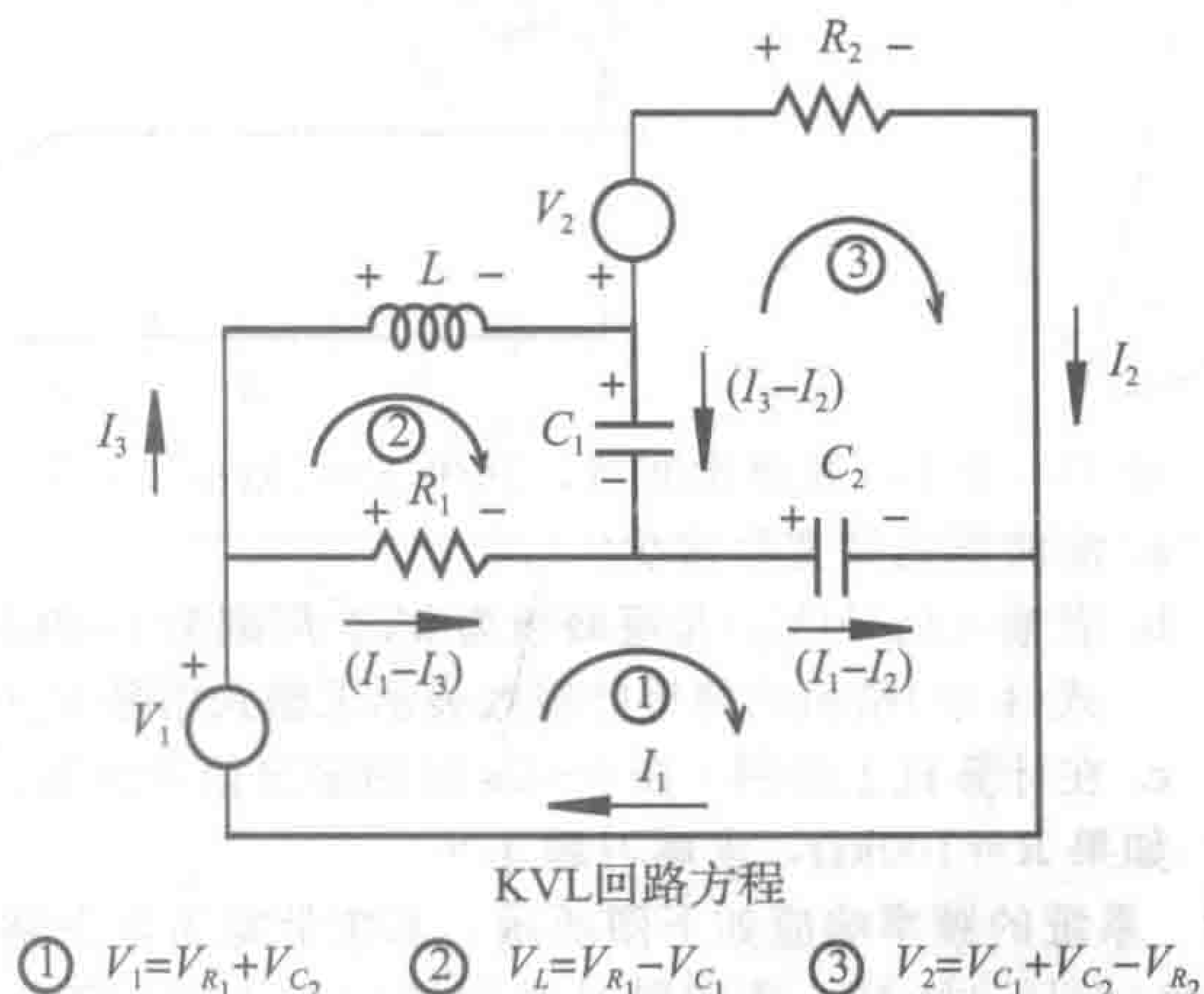


图 4-24 电气系统的相似示例

课堂讨论项目 4.10 **测量系统的物理特性**

惯性、电容与阻尼几乎一直出现在测量系统中，有时期望系统具有这些性质；其他时候又不期望其具有这些性质。考虑包含机械、电气或液压元器件的测试系统示例，并讨论改变系统物理特性的优缺点，并说明如何改变。

问题和练习

4.1 对于不同的测量系统，如其输入(V_{in})与输出(V_{out})存在如下所示的关系，请指出其是线性的还是非线性的？

a. $V_{out}(t)=5V_{in}(t)$

b. $V_{out}(t)/V_{in}(t)=5t$

c. $V_{out}(t)=V_{in}(t)+5$

d. $V_{out}(t)=V_{in}(t)+V_{in}(t)$

e. $V_{out}(t)=V_{in}(t)\times V_{in}(t)$

f. $V_{out}(t)=V_{in}(t)+10t$

g. $V_{out}(t)=V_{in}(t)+\sin(5)$

4.2 求波形 $f(t)=5\sin(2\pi t)$的傅里叶级数与基频(Hz)。

4.3 求美国家庭的标准交流电压的傅里叶级数与基频(以 rad/s 为单位)。

4.4 证明式(4-7)与式(4-9)联立等效于式(4-3)。

4.5 证明式(4-10)定义的方波中傅里叶级数的系数 A_n 为 0。

4.6 半正弦脉冲序列波形的离散傅里叶级数的数学表达如下：

$$V(t)=\frac{1}{\pi}+\frac{\sin(2\pi t)}{2}-\frac{2}{\pi}\left[\frac{\sin(4\pi t)}{1\cdot 3}+\frac{\sin(8\pi t)}{3\cdot 5}+\frac{\sin(12\pi t)}{5\cdot 7}+\cdots\right]$$

运用计算机绘图程序，绘制 $V(t)$的 3 个周期的波形，使其包含以下内容：

a. 直流分量＋一次谐波(基波)

b. 直流分量＋前 10 次谐波(注意其中部分谐波的幅值为 0)

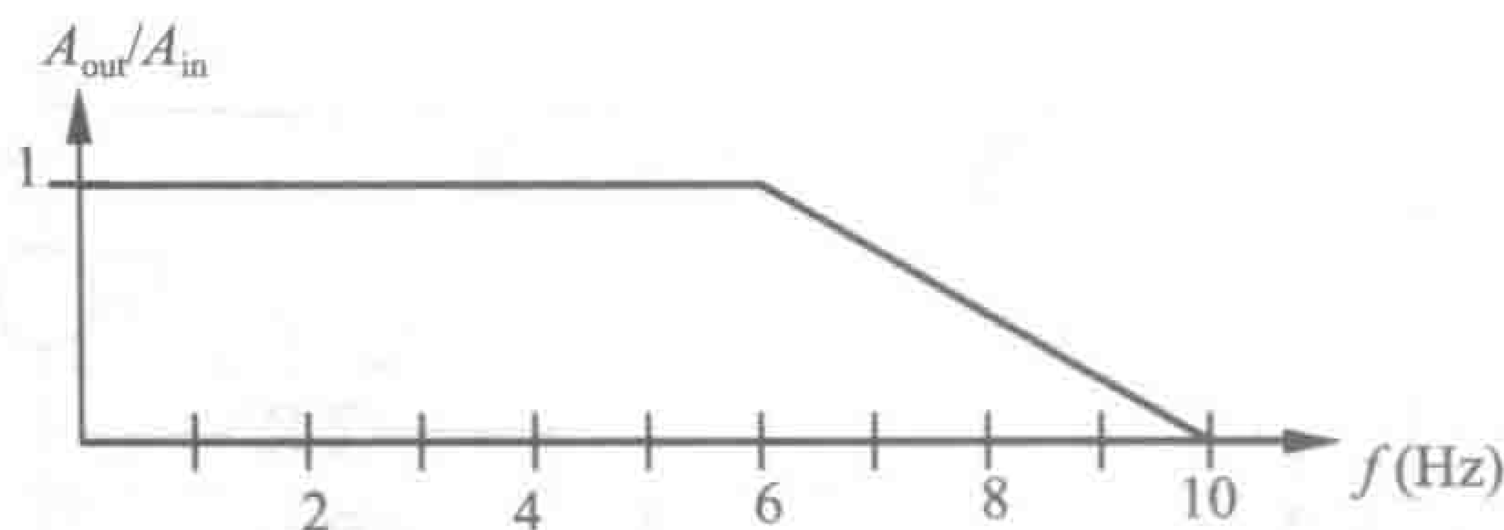
c. 直流分量＋你认为能够满足波形复现要求的足够多次谐波

4.7 测量系统的频率响应曲线如下所示：

a. 测量系统的带宽是多少？

b. 若输入信号(V_{in})是峰峰值为 2V、周期为 1s 的方波，则测量系统的稳态响应输出信号(V_{out})是什么？采用式(4-15)与式(4-16)给出的傅里叶级数表示求输入信号 $V_{in}(t)$的傅里叶级数。

c. 在计算机上绘制在 0～2s 间输出信号的波形。



4.8　对于一个 RC 低通滤波器，其中 $R=1\text{k}\Omega$，$C=1\mu\text{F}$，

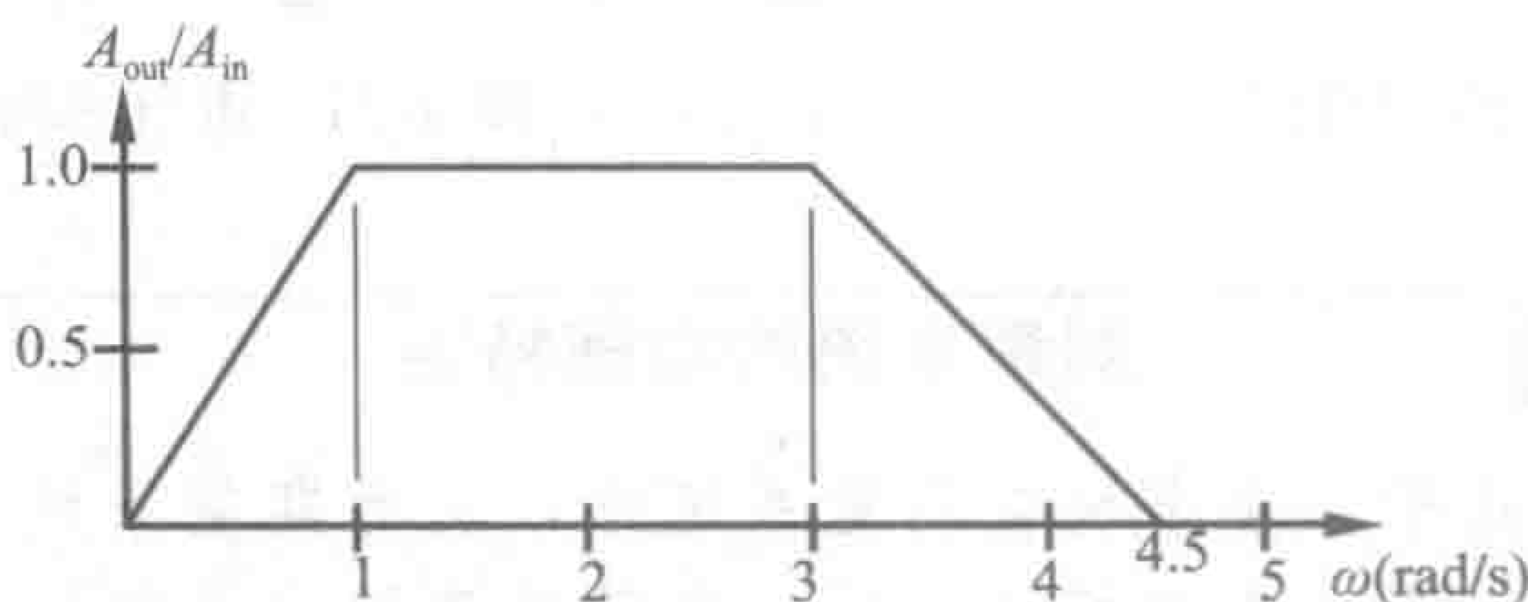
a. 滤波器的带宽是多少？

b. 若输入信号(V_{in})是峰峰值为 2V、周期为 1s 的方波，则滤波器的输出信号是什么？采用式(4-15)与式(4-16)给出的傅里叶级数表示求输入信号 $V_{in}(t)$。

c. 在计算机上绘制 t 在 0～2s 间的输出信号波形。

4.9　如果 $R=100\text{k}\Omega$，求解习题 4.8。

4.10　系统的频率响应如下图所示，系统带宽为多少赫兹？



4.11　有一个信号如下所示：

$$F(t) = \sum_{n=1}^{5} n\sin(n\omega t)$$

式中，$\omega=1\text{rad/s}$，

a. 信号的频率范围是多少？

b. 绘制 $F(t)$的频谱图。

c. 假设采用具有习题 4.10 给出的频率响应曲线的测量系统检测该信号，绘制系统输出信号的频谱。

4.12　确定高通滤波器(参见例 4.1)的频率响应曲线，并推导截止频率的表达式。

4.13　推导例 4.1 中的低通滤波器的输出与输入电压信号的相位差表达式，并绘制频率范围为 0～2.5 倍截止频率的输出结果。

4.14　整理课堂讨论项目 4.2 的结论文档。

4.15　采用式(4-15)或式(4-16)给出的方波信号的傅里叶级数，绘制利用前 20 次谐波叠加得到的方波。然后，当前 3 次谐波衰减四分之一后绘制叠加的波形，最后，利用前 3 次谐波未衰减及其后的 17 次谐波衰减四分之一绘制叠加的波形。从低次谐波与高次谐波对信号幅值的影响可以得出哪些结论？

4.16　绘制课堂讨论项目 4.3 中给出的指数衰减项对应的频率响应曲线。

4.17　简易静态弹簧秤是零阶系统的一个实例，输入为待测的质量，输出为弹簧的校准偏差。考虑上述描述，该弹簧秤的增益或灵敏度是什么？

4.18　一般假设示波器为零阶测量系统，为什么？何种情况下该假设不成立？

4.19　根据电路系统的通用一阶微分方程，例 4.1 给出了低通滤波器的时间常数、截止频率以及带宽间的关系，那么微分方程中的独立变量是什么？若给该系统施加一个幅值为 A_i 的阶跃输入信号，写出关于时间的输出信号 $V_{out}(t)$的表达式。假设此时电容开始放电。

4.20　玻璃温度计是一阶系统的一个实例，其输入为环境温度(T_{in})，输出(T_{out})为玻璃腔内液体的温度，并提供数值指示刻度尺。运用基本热传递原理，即对流的传热速度等于液体内部能量的变化率，建立系统的方程并整理成标准形式。辨识系统的时间常数并分析传热参数、流体属性与 RC 电路中电气参数之间的关系(参见习题 4.19)。方程中的参数包括流体质量(m)、比热(c)、玻璃腔外部

面积(A)以及传热导系数(h)。

4.21　一个系统采集的数据集如下所示，如果此时判断该系统为一阶系统是否合适？如果该系统为一阶系统，求出系统的时间常数。系统的静态灵敏度的近似值是多少？

t	$X_{out}(t)$	t	$X_{out}(t)$
0.0	0.0	0.6	4.2
0.1	1.4	0.7	4.6
0.2	2.3	0.8	4.7
0.3	3.0	0.9	4.8
0.4	3.6	1.0	4.9
0.5	4.1		

4.22　二阶系统的阻尼自然频率是大于还是小于系统的自然频率？并解释原因。

4.23　对于下列 3 类二阶系统，绘制其原理图并写出系统方程。

a. 机械旋转系统

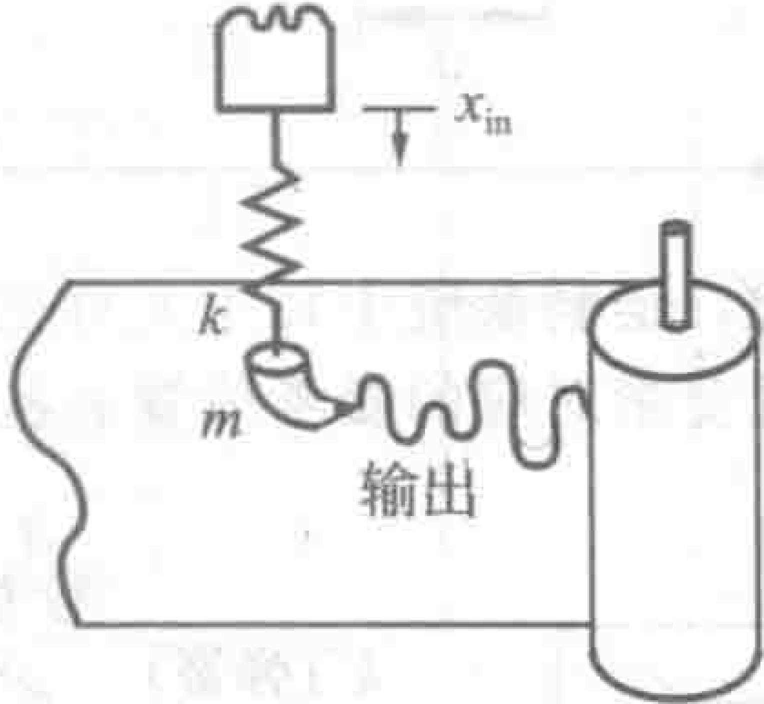
b. 电气系统

c. 液压系统

4.24　采用 4.10.2 节给出的步骤求用标准形式表示的一阶系统的幅值比与相位差，MathCAD 示例 4.7 给出了这个结果对应的图形。

4.25　一个弹簧-质量-阻尼系统，其中 $F_{ext}(t)=20\sin(0.75t)$N，$m=10$kg，$k=12$N/m，$b=10$N·s/m，求 $x(t)$的静态正弦响应方程。

4.26　一个廉价的机械式纸带信号记录系统，包括弹性系数为 k 的弹性带驱动、质量为 m 的绘图头，其工作原理如下图所示。



输入位移 x_{in}通过弹簧机械耦合至笔头，弹性系数 k 为 32.4N/m，笔头的质量为 0.10kg，考虑位移输入，求笔头运动的微分方程。假设笔头与纸带间的阻尼系数为 10N·s/m，采用 4.10.2 节给出的步骤，对于下列所示的稳态输入信号，分别求稳态输出位移的幅值与相位角。并解释输出与输入间位移与相位角的差异。

a. $x_{in}=0.05\sin(10t)$

b. $x_{in}=0.05\sin(1000t)$

c. $x_{in}=0.05\sin(10\,000t)$

4.27　整理课堂讨论项目 4.5 的结论文档。

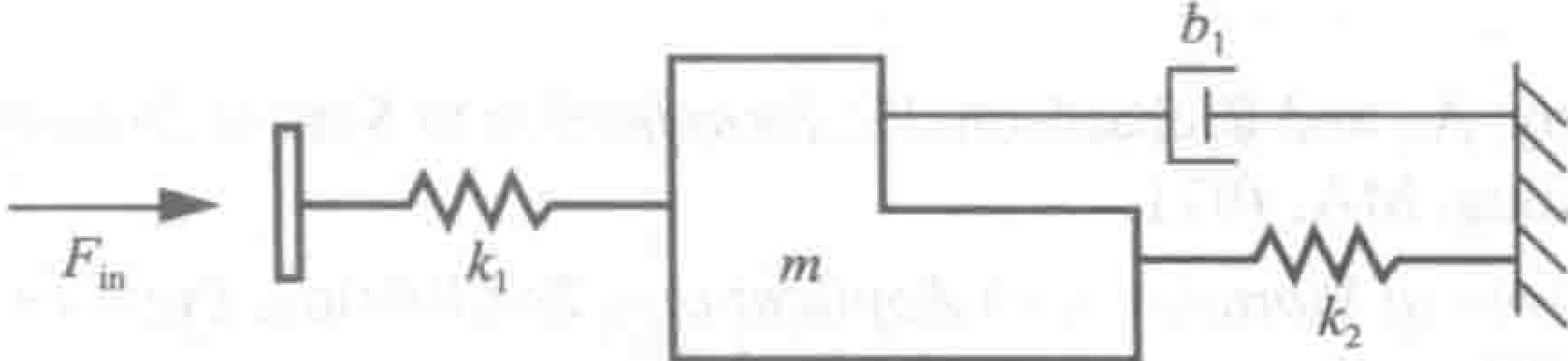
4.28　求设计实例 4.1 中阶跃响应 $x(t)$的表达式。

4.29　整理课堂讨论项目 4.8 的结论文档。

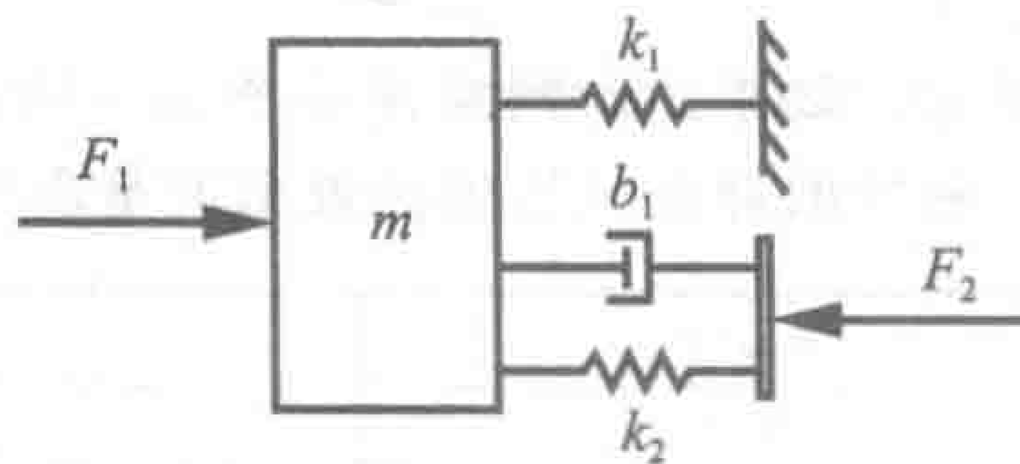
4.30　运用电容器储能方程求直径为 D、液位高度为 h、底部进液比重为 γ 的圆柱容器的电容表达式。

4.31　有一长度为 L、横截面积为 A 的直管，外力 $F=ma$ 作用于流体周围的控制体，运用惯性储能方程求直管中流体的惯性表达式。

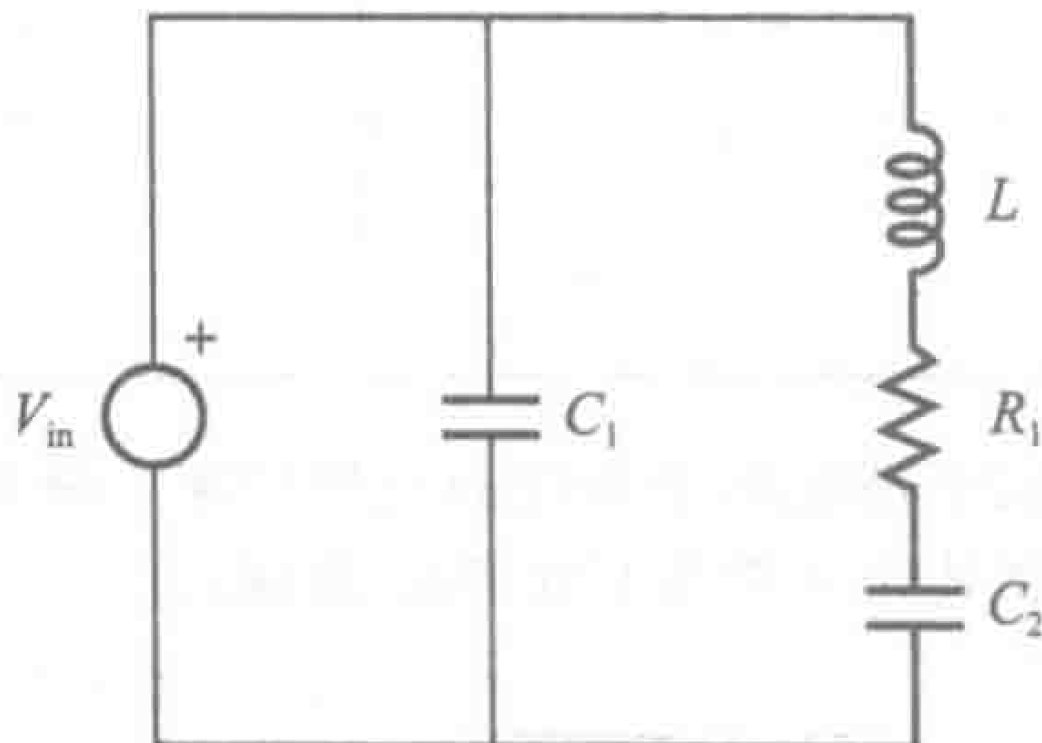
4.32　将如下所示的平移机械系统转换为相似的电气系统。



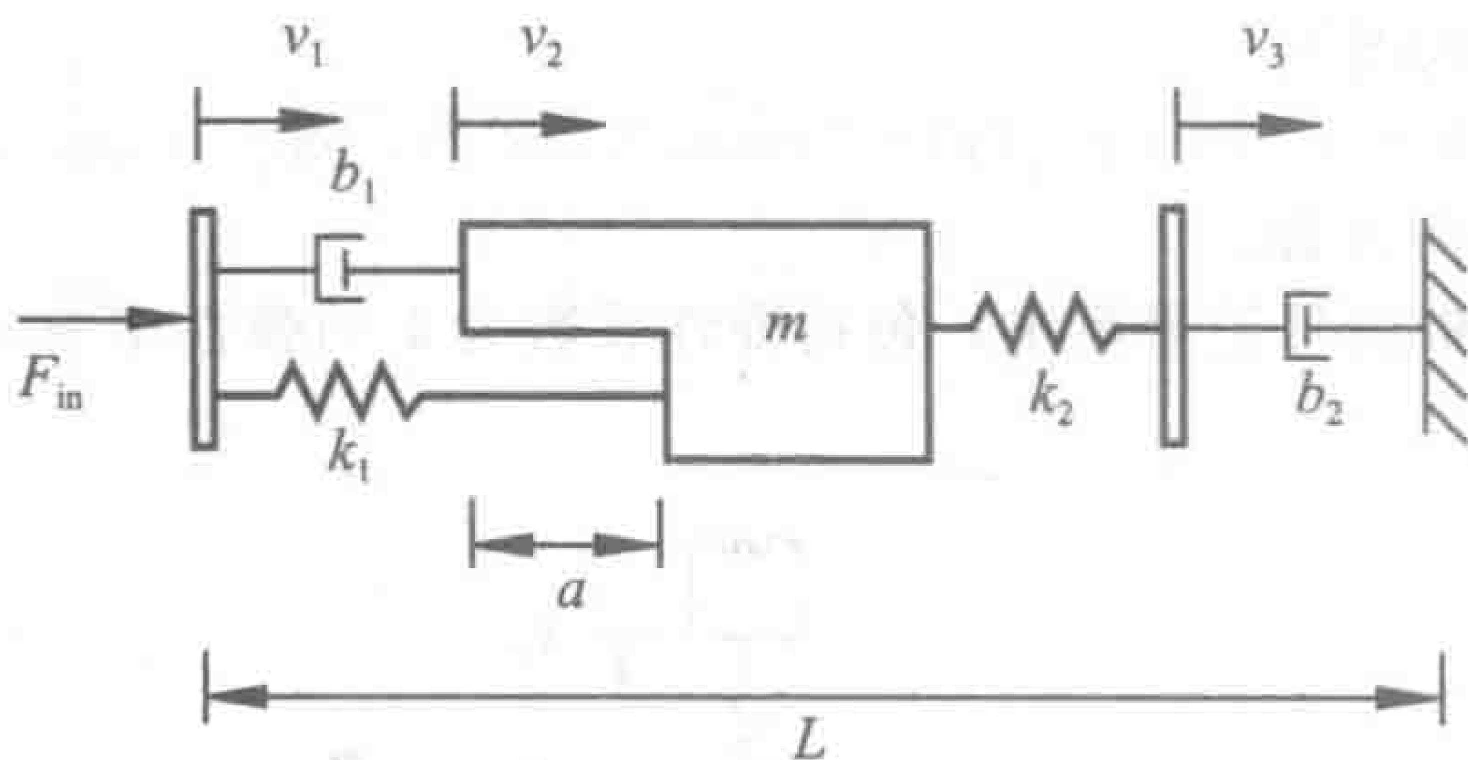
4.33　将如下所示的平移机械系统转换为相似的电气系统。



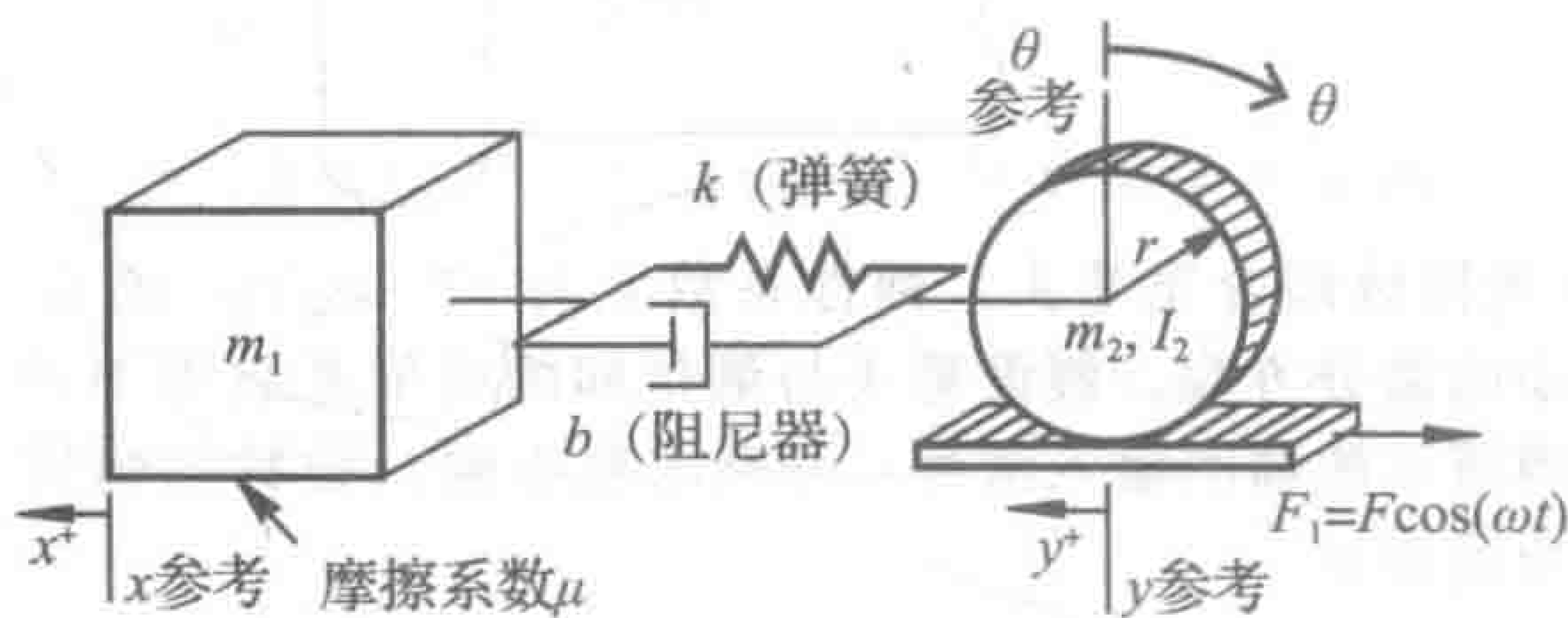
4.34　将如下所示的电气系统转换为相似的液压系统。



4.35　一个平移机械系统如下所示，画出每个节点的受力图，列出每个元件的方向，并绘制与所有元件和标注方向相对应的相似电气系统。



4.36　下图所示为三自由度机械系统，绘制系统中每个元件的受力图，仔细标注所有的外部作用力与力矩。在受力图中明确标注位置变量对应的参考位置。从元件受力图直接写出系统运动方程。



参考文献

Beckwith, T., Marangoni, R., and Lienhard, J., *Mechanical Measurement,* 5th Edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 1993.

Doebelin, E., *Measurement Systems Application and Design,* McGraw-Hill, New York, 1990.

Figliola, R. and Beasley, D., *Theory and Design for Mechanical Measurements,* John Wiley, New York, 1995.

Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers,* McGraw-Hill, New York, 1994.

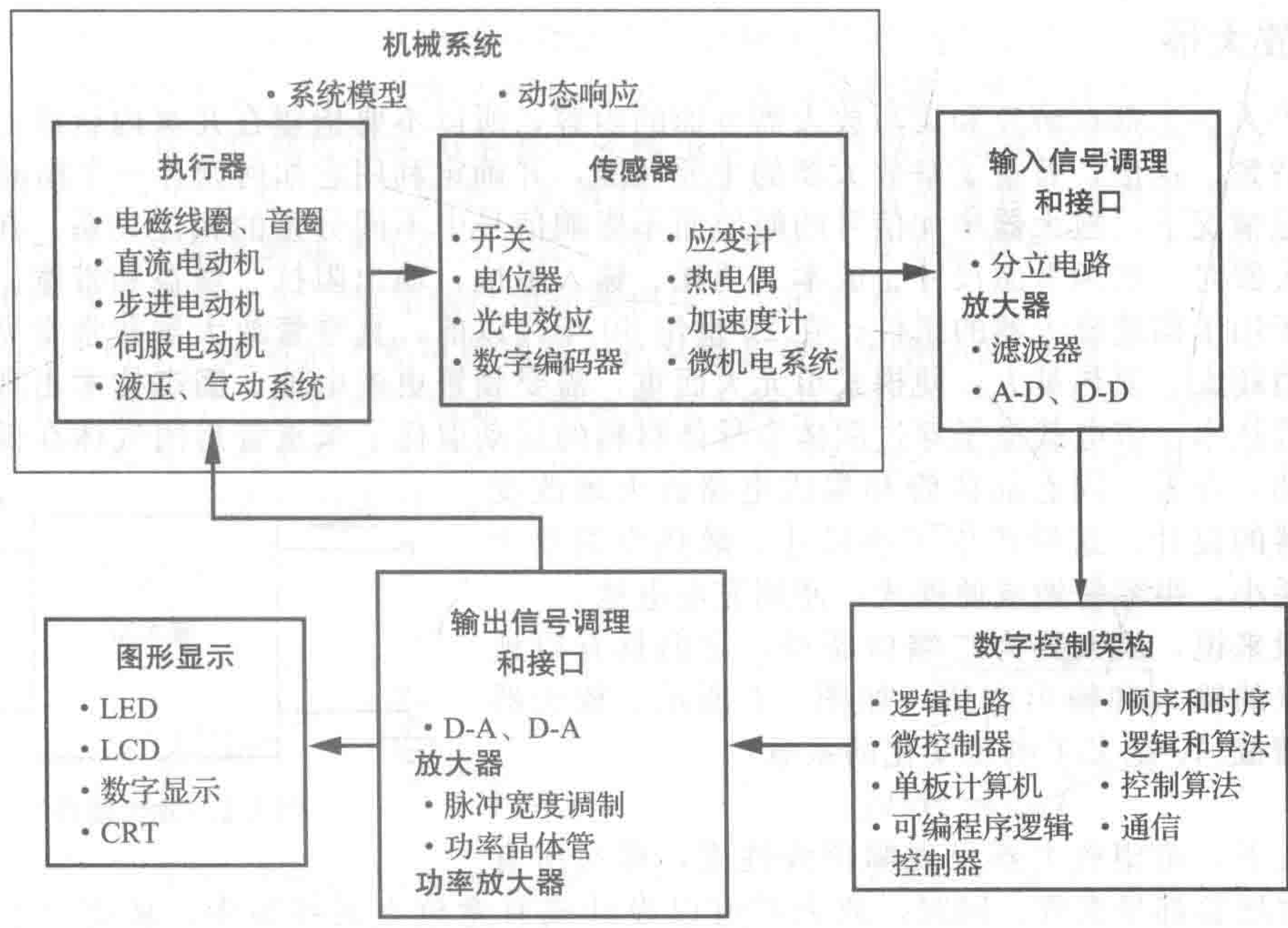
Ross, S., *Introduction to Ordinary Differential Equations,* 3rd Edition, John Wiley, New York, 1980.

Shearer, J., Murphy, A., and Richardson, H., *Introduction to System Dynamics,* Addison-Wesley, Reading, MA, 1971.

Thomson, W., *Theory of Vibration with Applications,* 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.

第5章 使用运算放大器的模拟信号处理

本章介绍了运算放大器电路，它是机电一体化系统中重要的模拟接口器件。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 了解线性放大器的输入/输出特性；
2. 了解如何在电路分析中使用理想运算放大器模型；
3. 知道如何设计运算放大器电路；
4. 能够设计反相放大器、同相放大器、加法器、差分放大器、测量放大器、积分器、微分器和采样保持放大器；
5. 了解运算放大器的“真实”特性和局限性。

5.1 引言

几乎所有的机电一体化和测量系统都要用到电路，因此，它是工程师了解电信号采集和处理的基础。通常这些信号来自变送器，它将物理量(如温度、应变、位移、流速)转换成电流或电压，通常是后者。变送器的输出通常为**模拟信号**，它是连续的且随时间变化的。

通常，来自变送器的信号不是我们希望的形式。它们：

- 太小，通常为毫伏级
- 有太多的“噪声”，这通常是由电磁干扰引起的
- 含有错误的信息，原因有时是由于变送器设计或安装不当造成的

● 有直流偏置，通常是由于变送器和仪表设计造成的

这些问题多数是可以修正的，所需的信号信息通过适当的模拟信号处理后可以提取。最简单和最常见的信号处理形式是放大，即增加电压信号的幅值。其他形式包括信号反转、微分、积分、加法、减法和比较。

数字信号与模拟信号不同，数字信号是离散的，只使用有限数量的状态或数值。由于计算机和微处理器使用数字信号，所以任何涉及计算机测量或控制的应用都需要模-数转换。本章介绍包括信号处理电路设计和分析在内的模拟信号处理的基本要素。运算放大器是用来搭建这些电路的集成电路。第 6 章着重于数字电路，第 8 章涉及把模拟信号转换成数字信号的过程，以便让数字装置(如计算机)可以处理。

5.2　放大器

许多人一生都在研究和撰写放大器方面的内容，所以不要指望在几页内就能对这个问题阐述清楚。这里，着重了解放大器的主要性能，并确定利用它如何设计一个集成电路。

理想情况下，**放大器**增加信号的幅值而不影响信号中不同分量的相位关系。在选择或设计放大器时，必须考虑尺寸、成本、功耗、输入阻抗、输出阻抗、增益和带宽。物理尺寸取决于用于构造放大器的组件。在 20 世纪 60 年代以前，真空管放大器非常常见，但是其功率消耗大、散热量大，便携式单元大而重，需要频繁更换电池。**固态**技术出现后取代了真空管技术，带电载流子穿过固体半导体材料的运动取代了笨重管封闭气体在低压下的电子流动。今天，固态晶体管和集成电路极大地改变了放大器的设计，这样产生了小尺寸、散热少的放大器，能耗小，很容易做成便携式，使用充电电池。

一般来说，放大器为二端口器件，它们具有以地为参考点的输入和输出电压，如图 5-1 所示。放大器的电压**增益** A_V 定义了电压变化的系数：



图 5-1　放大器模型

$$V_{out} = A_V V_{in} \tag{5-1}$$

通常情况下，希望放大器呈现幅值线性度，即对所有频率而言增益都是常数。同时，放大器可以设计成有意放大某些频率，从而产生滤波效果。在这种情况下，输出特性由放大器的带宽和相关的截止频率确定。

放大器的输入阻抗 Z_{in} 定义为输入电压与电流之比：

$$Z_{in} = V_{in}/I_{in} \tag{5-2}$$

大多数放大器都有一个很大的输入阻抗，所以输入端几乎没有电流。

输出阻抗是测量输出电压降随输出电流下降的程度。

$$Z_{out} = \Delta V_{out}/I_{out} \tag{5-3}$$

式中，电压降 ΔV_{out} 是没有电流输出时的相对电压。大多数放大器设计的输出阻抗都非常小，所以输出电压随输出电流的变化而改变不大。

有关输入和输出阻抗的更多信息见 2.4 节。放大器的输入阻抗与电压表类似，输出阻抗与电压源类似。

5.3　运算放大器

运算放大器是把许多晶体管、电阻和电容制造在单个硅芯片上的低成本、多功能集成电路。它可以与外部分立元器件相结合创建各种各样的信号处理电路。运算放大器是下列电路的基本器件：

● 放大器
● 积分器
● 加法器

- 微分器
- 比较器
- A-D 和 D-A 转换器
- 有源滤波器
- 采样和保持电路

在随后的章节中会给出这些应用。运算放大器的名称来自它能执行许多不同运算操作的能力。

5.4　运算放大器的理想模型

图 5-2 显示了理想运算放大器的原理图符号和端子名称。它是假定具有无限增益的差分输入、单输出放大器。这两个输入中标有负号的称为**反相输入**而标有加号的称为**同相输入**。符号“∞”有时在原理图中用来表示无限增益，并假设它是理想的运算放大器(简称运放)。所有电压都参考一个公共地。运算放大器是一个**有源器件**，需要连接外部电源，通常为±15V。外部电源通常不会在电路原理图上显示。由于运算放大器是有源器件，所以输出电压和电流可能大于施加到反相和同相端子上的信号。

如图 5-3 所示，运算放大器电路通常包括从输出到反相输入的**反馈**。这种所谓的**闭环**配置可使放大器稳定工作和控制增益。当运算放大器中没有反馈电路时，运算放大器称为**开环**配置。这种配置由于具有非常高的增益所以十分不稳定，并且很少使用。在下面章节给出的例子中，反馈的效用将得到体现。

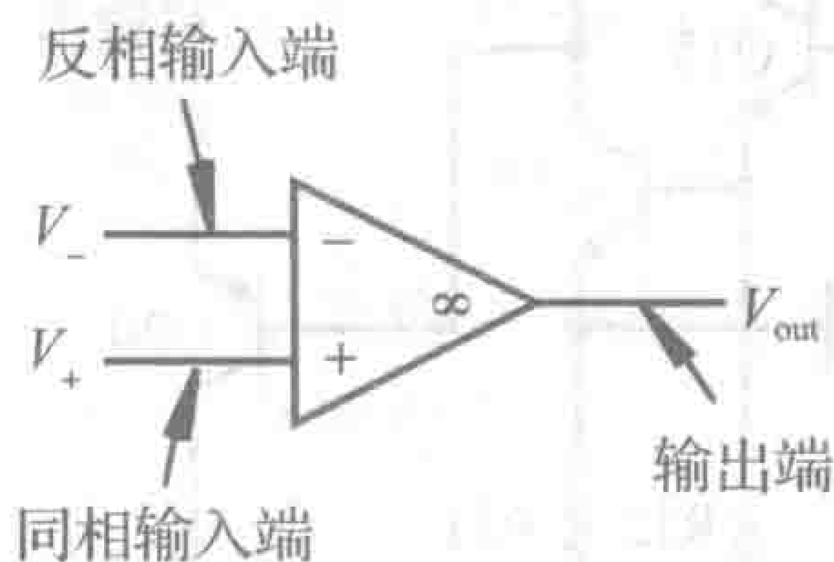


图 5-2　运算放大器的端子和原理图表示

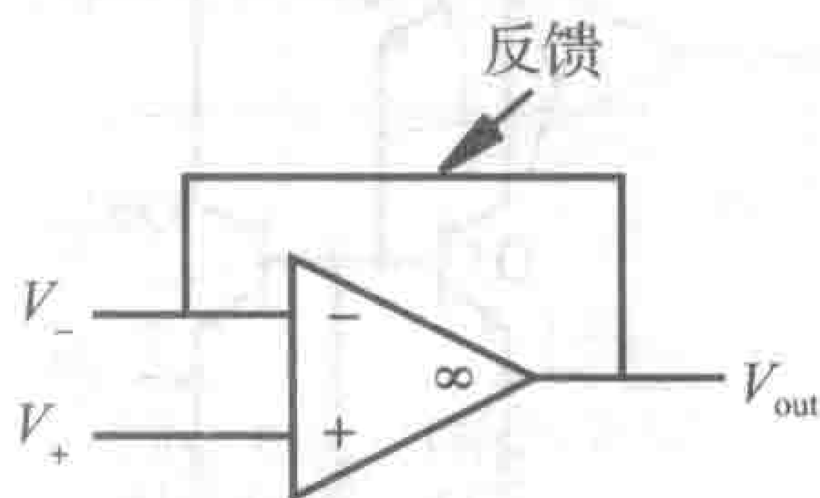


图 5-3　运算放大器的反馈

图 5-4 给出了一个理想的模型，它可以帮助分析包含运算放大器的电路。该模型基于理想运算放大器的以下假设：

1. 两输入端的阻抗无穷大。因此，没有电流从输入电路中流过。因此：

$$I_+ = I_- = 0 \tag{5-4}$$

2. 具有无穷大的增益。因此，输入电压之差必须为 0；否则，输出为无穷大。在图 5-4 中这通过两个输入端的短路来表示。即：

$$V_+ = V_- \tag{5-5}$$

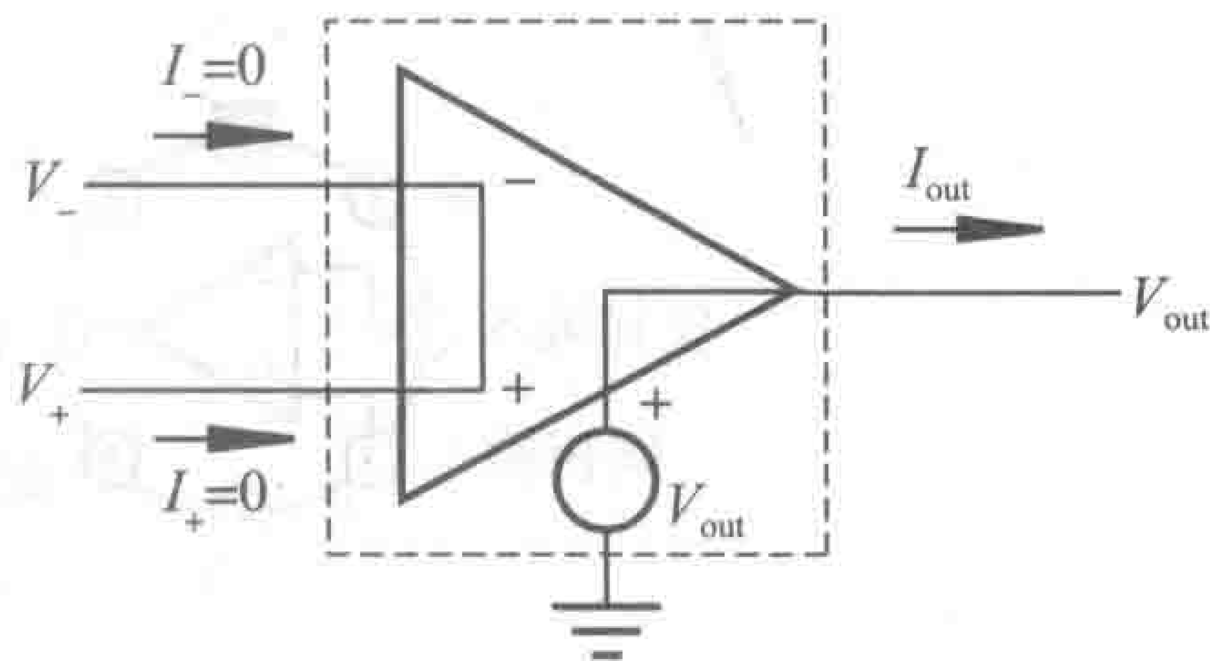


图 5-4　运算放大器的等效电路

即使两输入端间已经短路，假设仍没有电流流过。

3. 它具有零输出阻抗。因此，输出电压不依赖于输出电流。

注意，V_{out}、V_+、V_- 都参考一个共同地。此外，对于稳定的线性特性，输出和反相输入之间必须有反馈。

这些假设和模型可能看起来不合逻辑并且非常混乱，但当用在包括负反馈的电路中时，它们提供了与实际运算放大器近似的性能。借助于该理想模型，只要用基尔霍夫定律和欧姆定律就可以分析运算放大器电路了。

实际的运算放大器通常封装在 8 引脚双列直插封装(DIP)集成电路(IC)中，有时称为芯片。许多 IC 制造商生产的通用运算放大器的型号为 741。图 5-5 给出了其引脚配置(引脚输

出)。与所有 IC 一样，芯片的一端标记有凹痕或点，并且(从 IC 的顶部看)引脚逆时针编号，在标记端的左侧从 1 开始连续编号。对于 741 系列运算放大器，引脚 2 是反相输入，引脚 3 是同相输入，引脚 4 和 7 用于连接外部电源，引脚 6 是运放输出。通常不使用引脚 1、5 和 8，并且不需要连接。图 5-6 说明了美国国家半导体提供的 741 IC 的内部设计。注意，电路由容易在单个硅芯片上制造的晶体管、电阻和电容组成。对于用户最有价值的信息是电路的输入和输出部分具有影响外部连接元器件的特性。

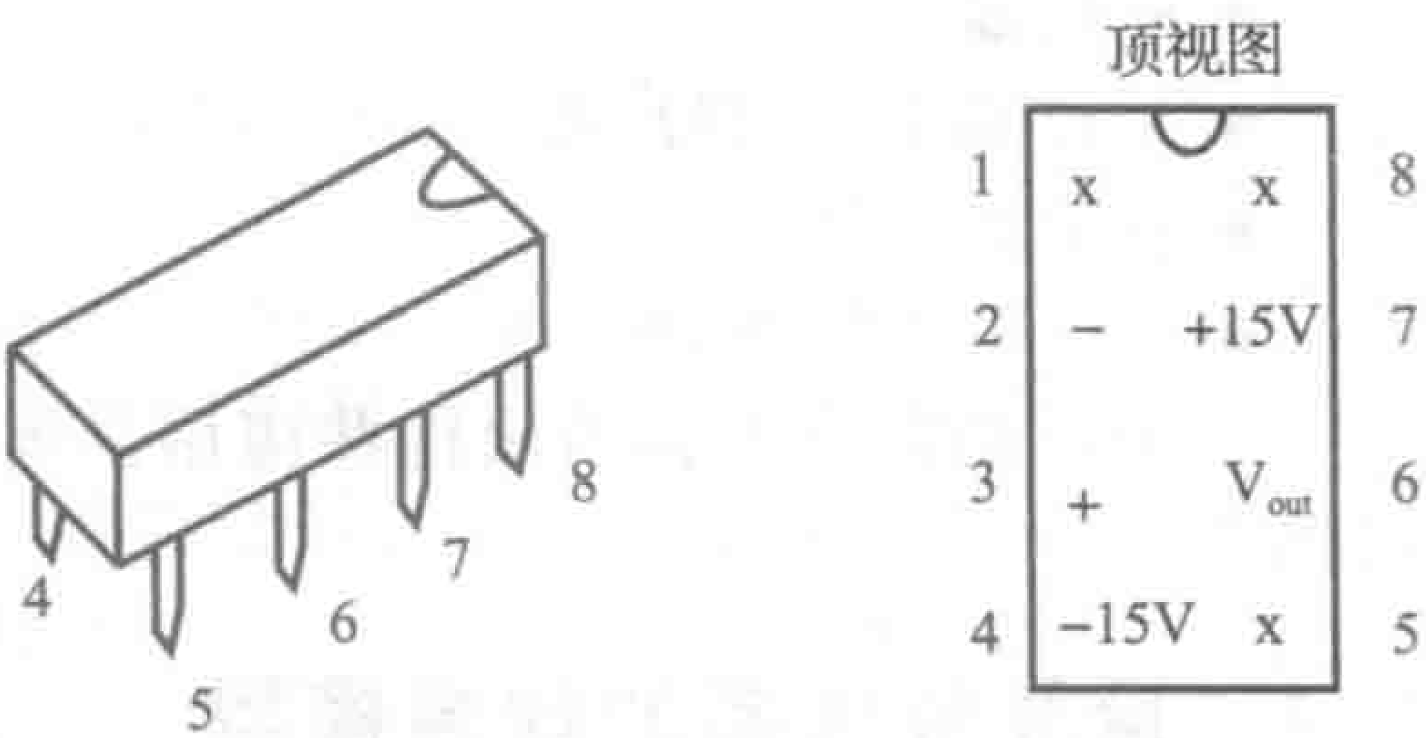


图 5-5 741 运算放大器的引脚

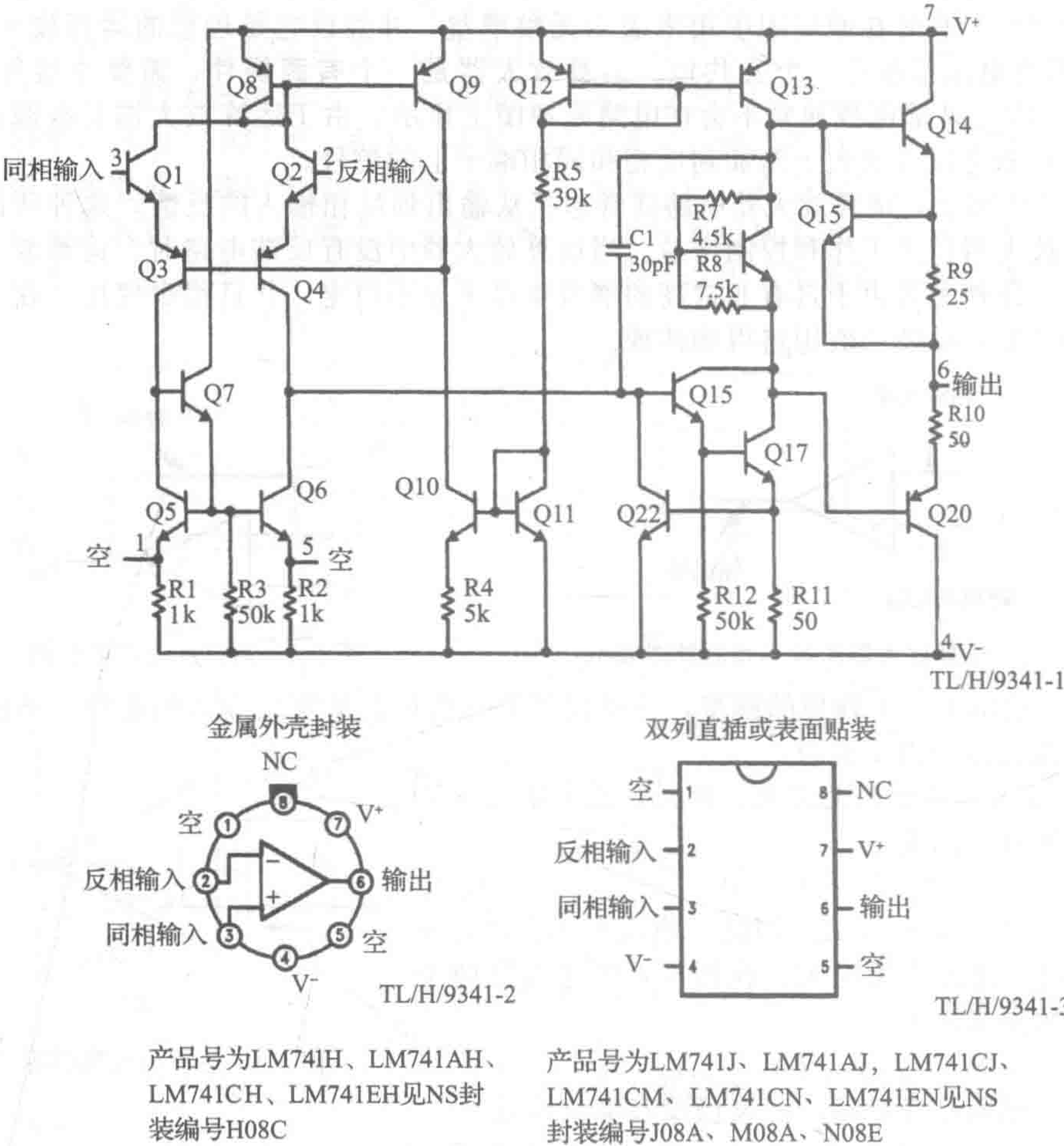


图 5-6 741 的内部设计(由美国加利福尼亚州圣克拉拉的国家半导体提供)

集成电路的制造非常复杂，需要非常昂贵的设备。视频演示 5-1 展示了制造 IC 的各种常用封装，视频演示 5.2～视频演示 5.4 描述和说明了制造过程的所有步骤。幸运的是，由于在消费和工业应用中使用的器件产量高，规模经济占优势，因此 IC 可以以非常实惠的价格销售。

IC 制造商提供许多不同的运算放大器设计。输入阻抗、带宽和额定功率的规格非常多。此外，有些仅需要单输出(单极)电源。虽然 741 使用广泛，但另一个通用运算放大器

是由德州仪器公司制造的 TL071。其引脚配置与 741 相同，但由于它具有场效应晶体管输入，因此具有更大的输入阻抗和更宽的带宽。

IC 制造商在名为**数据手册**的文档中提供其器件的完整信息。网络链接 5.1 和 5.2 指向 741 和 TL071 的完整数据手册。如果你没有太多的经验，那么看这些数据手册的工作量可能是巨大的。但它们包含需要使用的器件的所有信息。有用的信息包括器件引脚(见图 5-5)，输入和输出电流和电压规格，电压源要求以及阻抗。本章结尾的 5.14 节提供了一些查找数据手册的指南。

5.5 反相放大器

通过将两个外部电阻连接到运算放大器上可构建**反相放大器**，如图 5-7 所示。顾名思义，该电路将输入电压反相并放大。注意，电阻 R_F 形成反馈回路。该反馈回路总是从输出到运算放大器的反相输入，这意味着负反馈。

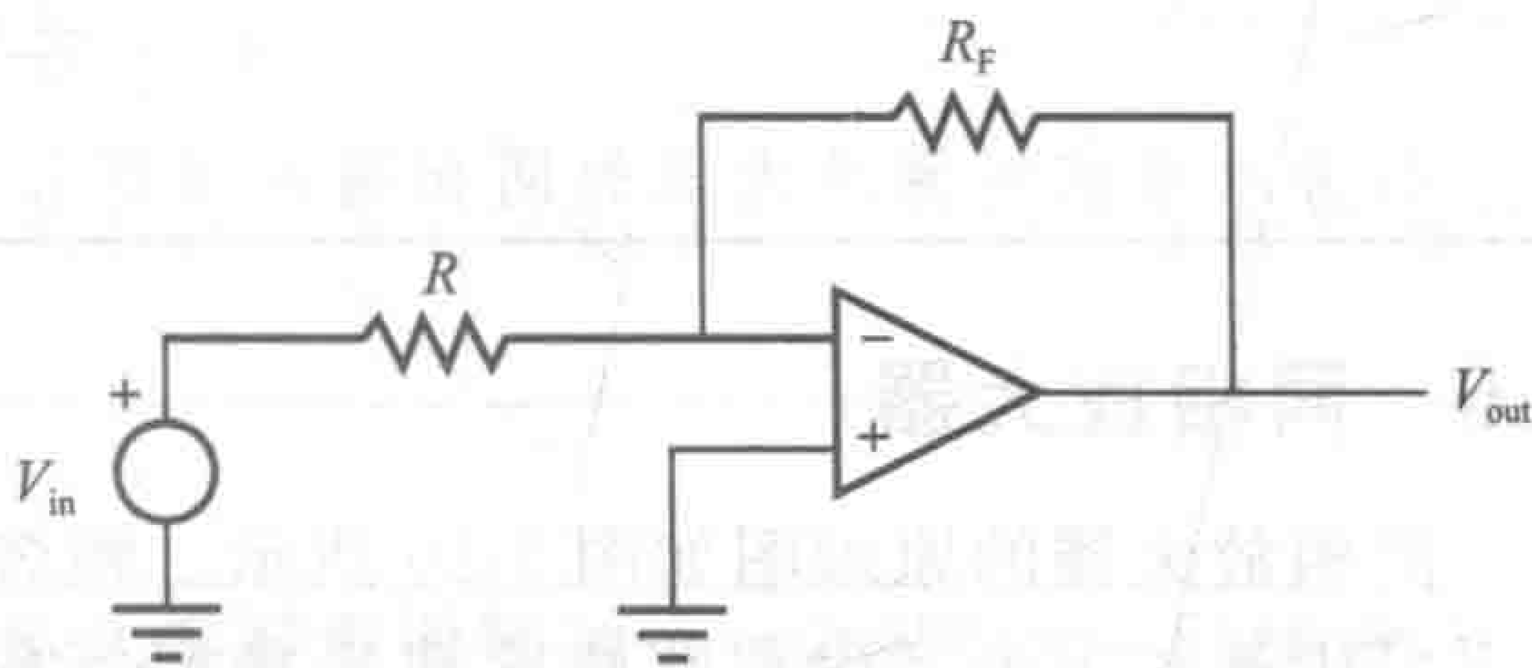


图 5-7 反相放大器

使用基尔霍夫定律和欧姆定律分析这个电路。首先，用图 5-8 中虚线框所示的理想模型来替换运算放大器。

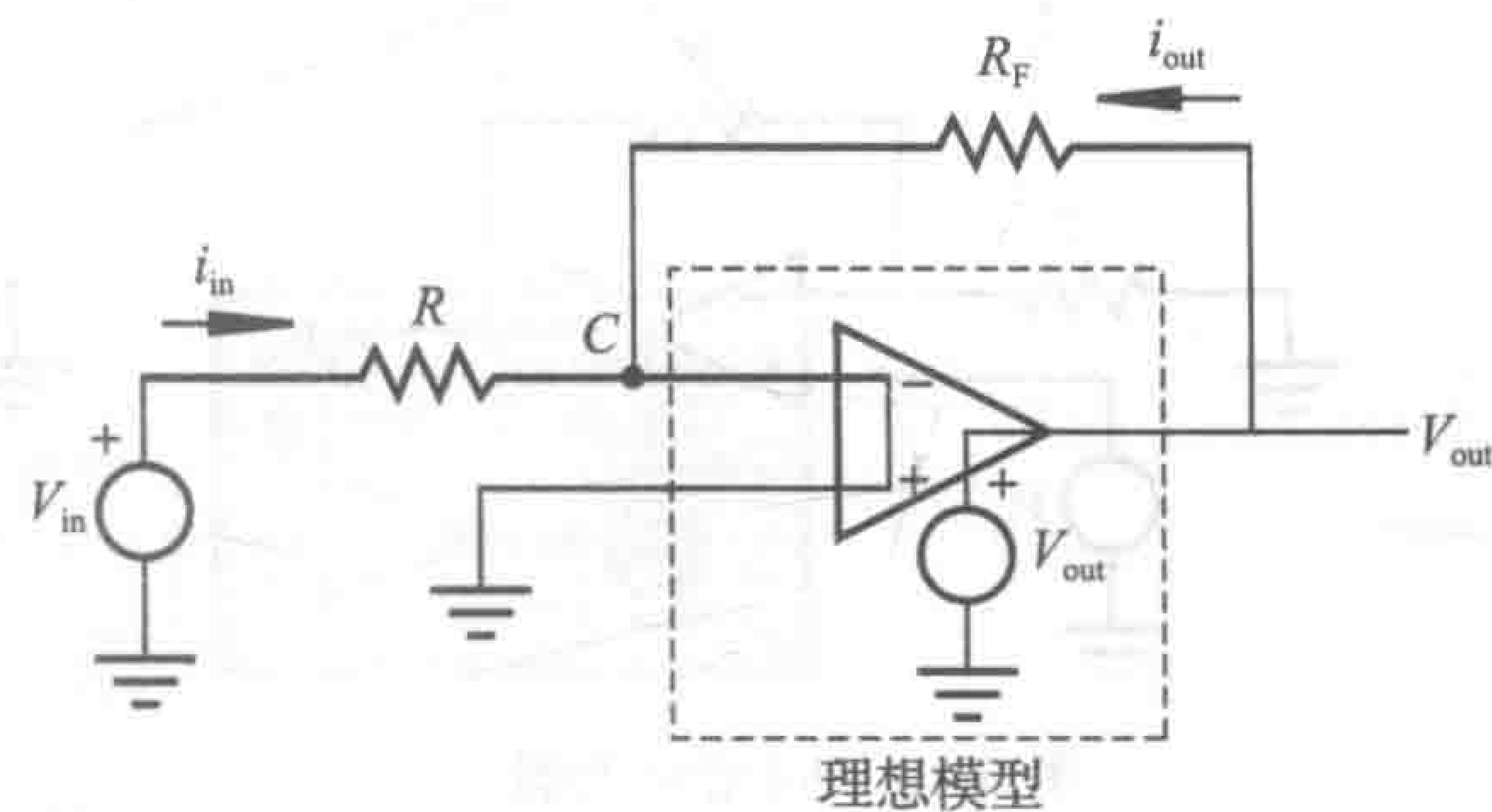


图 5-8 反相放大器的等效电路

在节点 C 应用基尔霍夫电流定律，并利用假设 1，没有电流可以流入运算放大器的输入端，

$$i_{in} = -i_{out} \tag{5-6}$$

此外，因为假定了两个输入在理想模型中短路，所以节点 C 为地电位：

$$V_C = 0 \tag{5-7}$$

根据欧姆定律，电阻 R 两端的电压为$V_{in}-V_C=V_{in}$，

$$V_{in} = i_{in}R \tag{5-8}$$

因为电阻器 R_F 两端的电压为 $V_{out}-V_C=V_{out}$，有：

$$V_{out} = i_{out}R_F \tag{5-9}$$

将式(5-6)代入式(5-9)可得：

$$V_{out} = -i_{in}R_F \tag{5-10}$$

由式(5-10)除以式(5-8)得输入/输出关系：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_F}{R} \tag{5-11}$$

由此可见，放大器的电压增益由外部电阻 R_F 和 R 确定，并且总是负的。这个电路称为反相放大器的原因是它能反转输入信号的极性。这导致周期信号的相位移动了 180°。例如，如果图 5-9 中所示的方波 V_{in} 连接到具有增益为 -2 的反相放大器上，

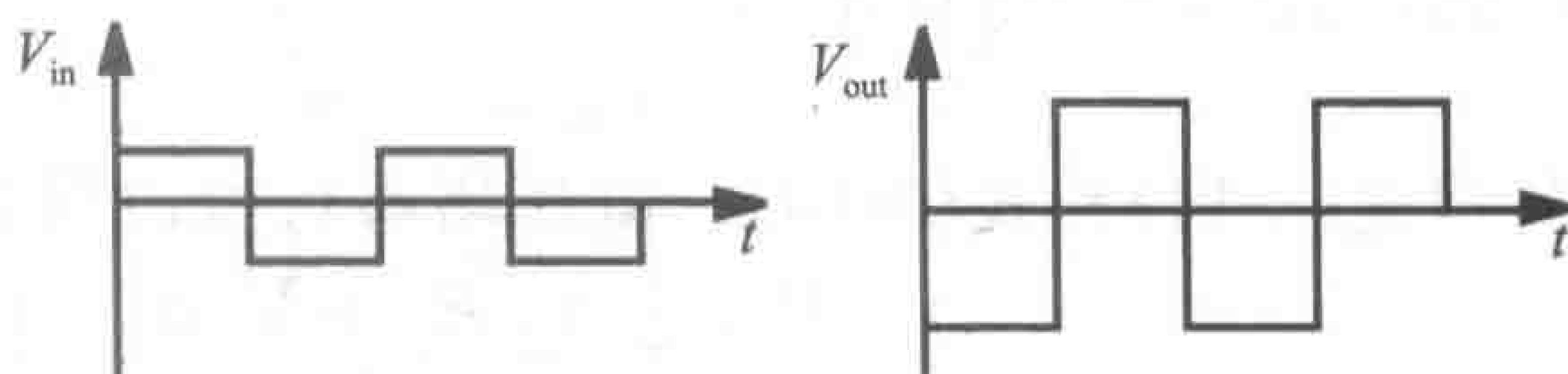
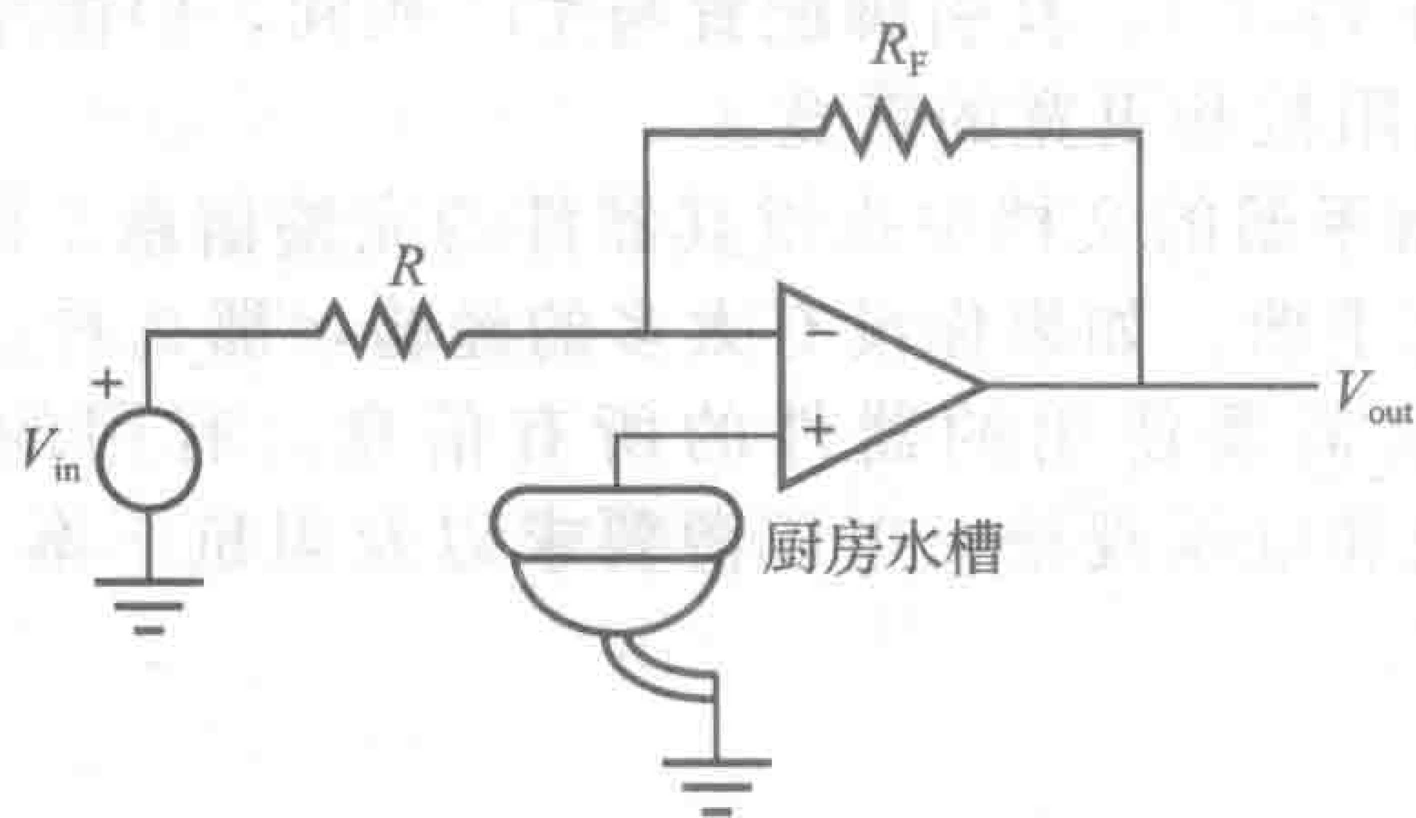


图 5-9 反转的例证

则输出 V_{out} 被反相并放大，致使大的幅值信号与输入的相位相差 180°。

课堂讨论项目 5.1　在厨房水槽中使用的运算放大器电路

考虑下面的运算放大器电路



厨房水槽在运算放大器的同相输入端起什么作用?

5.6 同相放大器

同相放大器的原理图如图 5-10 所示。顾名思义，该电路放大输入电压而不反转信号。可以应用基尔霍夫定律和欧姆定律来确定该放大器的电压增益。与之前一样，用图 5-11 中虚线框所示的理想模型替换运算放大器。

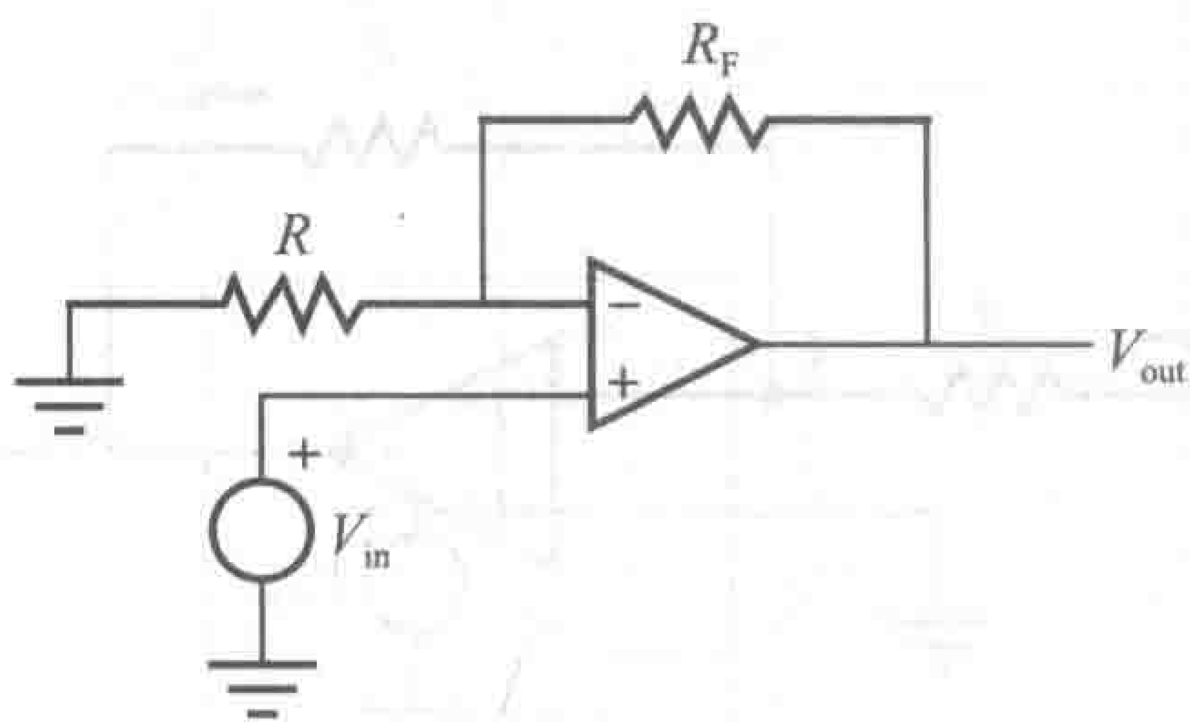


图 5-10　同相放大器

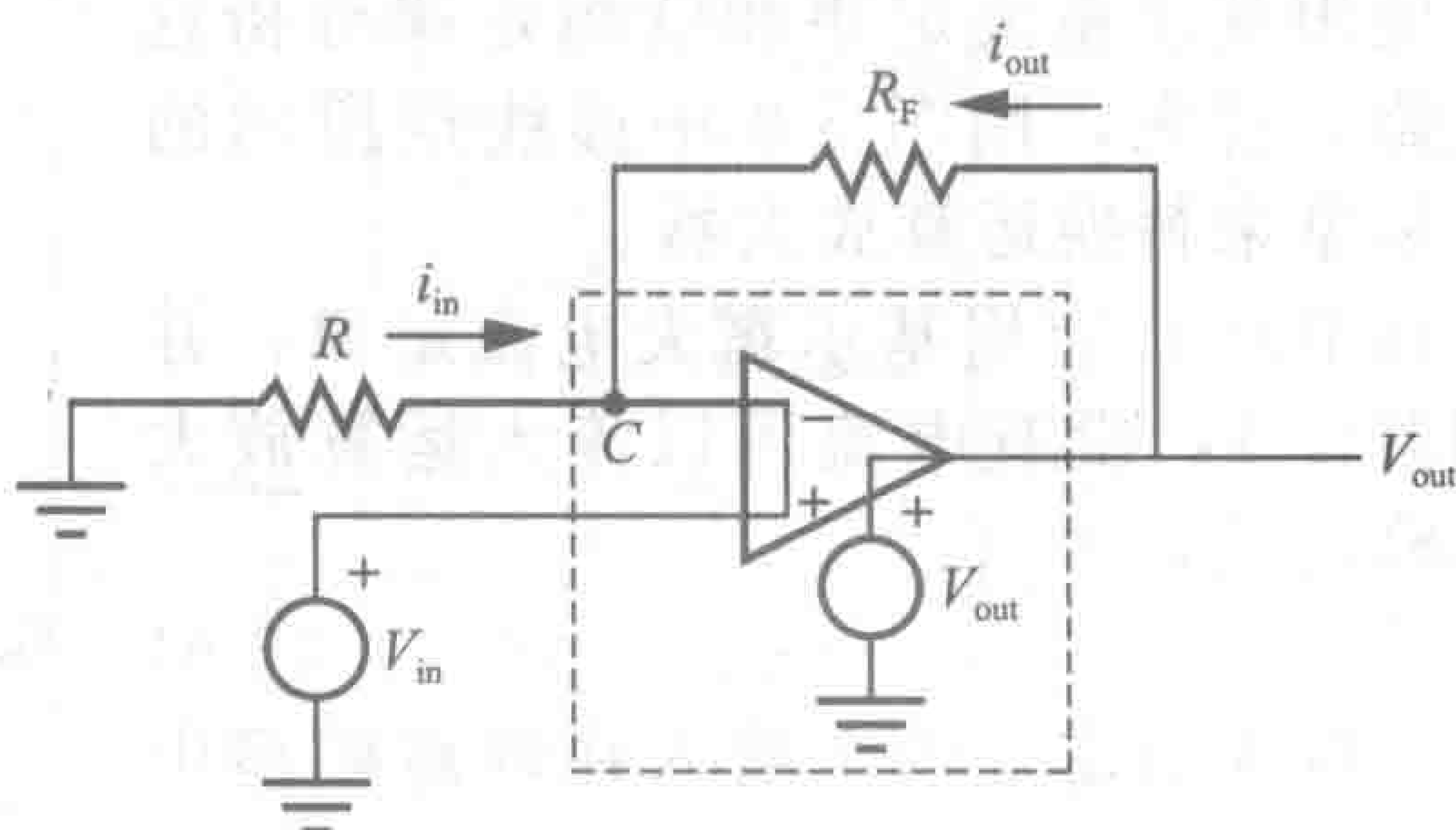


图 5-11　同相放大器的等效电路

因为反相和同相输入端的电压相同，所以节点 C 处的电压为 V_{in}。对电阻 R 应用欧姆定律：

$$i_{in} = \frac{-V_{in}}{R} \tag{5-12}$$

对电阻 R_F 应用欧姆定律：

$$i_{out} = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_F} \tag{5-13}$$

求解式(5-13)中的 V_{out} 得：

$$V_{out} = i_{out}R_F + V_{in} \tag{5-14}$$

在节点 C 应用基尔霍夫电流定律得：

$$i_{in} = -i_{out} \tag{5-15}$$

因此，式(5-12)可以重写为：

$$V_{in} = i_{out}R \tag{5-16}$$

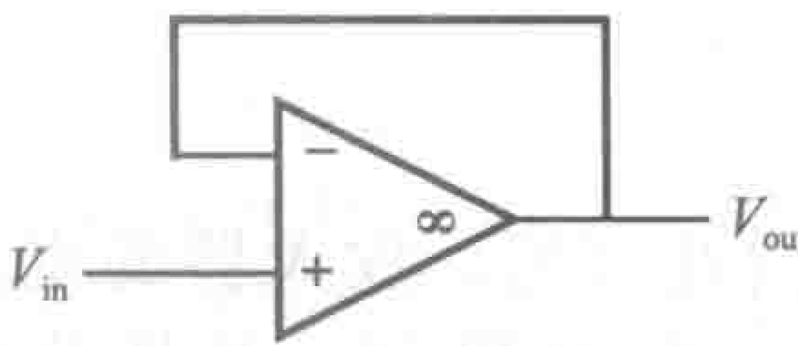


图 5-12　缓冲器或跟随器

利用式(5-14)和式(5-16)，电压增益可以改写为：

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{i_{out}R_F + V\,in}{V_{in}} = \frac{i_{out}R_F + i_{out}R}{i_{out}R} = 1 + \frac{R_F}{R} \tag{5-17}$$

因此，同相放大器具有大于或等于 1 的正增益。同相放大器几乎不需要从信号源汲取可观的电流即可实现成比例电压的传输，这对电路隔离非常有用。

如果在图 5-10 中的同相运算放大器电路中令 $R_F=0$ 和 $R=\infty$，则所得电路如图 5-12 所示。这个电路称为**缓冲器**或**跟随器**，因为 $V_{out}=V_{in}$。它具有高输入阻抗和低输出阻抗。该电路在需要耦合到电压信号而不加载电压源的应用中非常有用。运算放大器的高输入阻抗有效地将源与电路的其余部分**隔离**。实验练习 6 通过展示如何利用电阻电路的电压而不

影响电路中流过的电流探讨了这一特点。

课堂讨论项目 5.2　正反馈

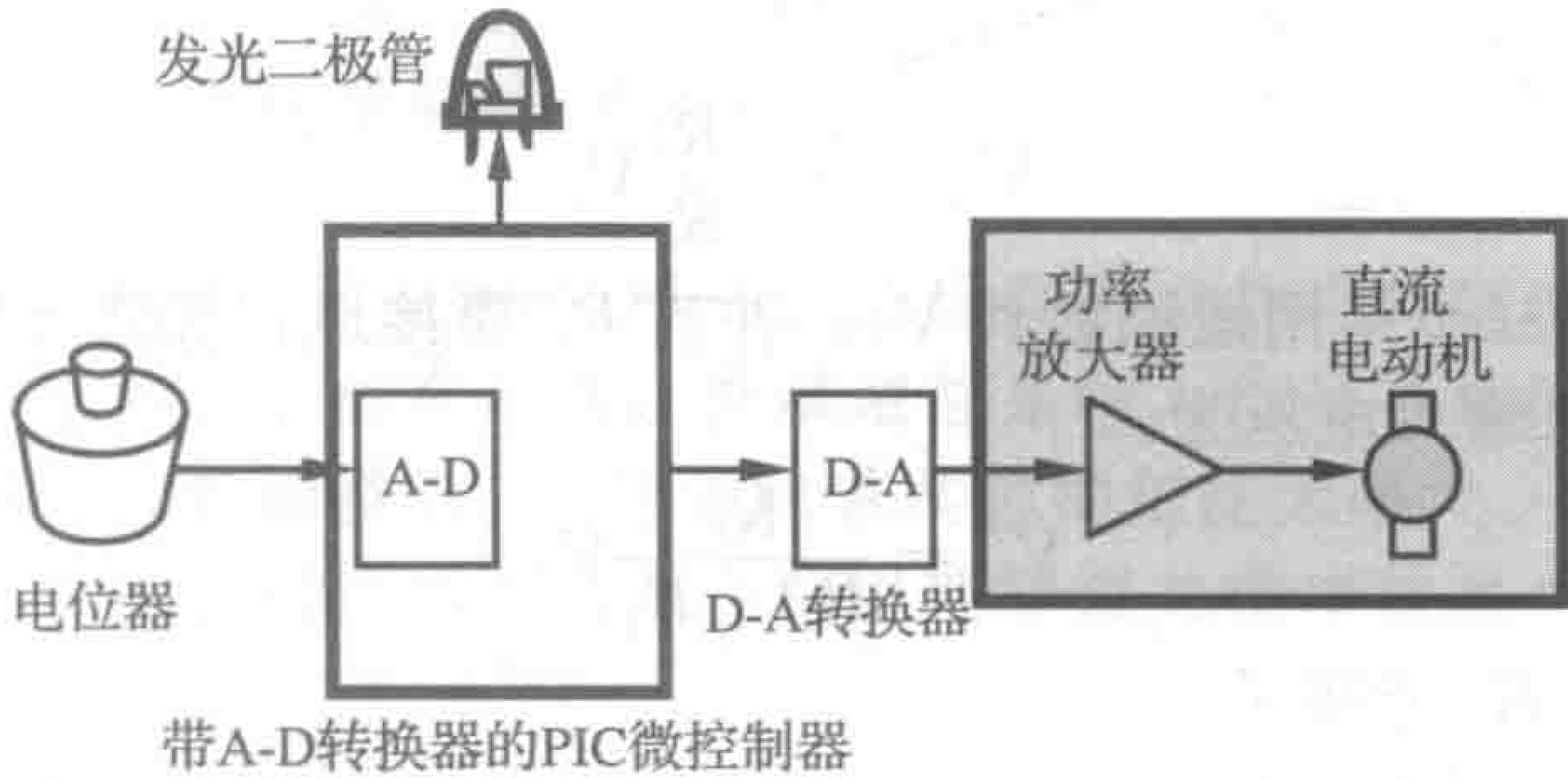
理想情况下，如果将 V_{in} 应用于反相输入，并且反馈是从输出到同相输入，则图 5-12 所示的缓冲放大器的输出会发生什么变化？

课堂讨论项目 5.3　正反馈的例子

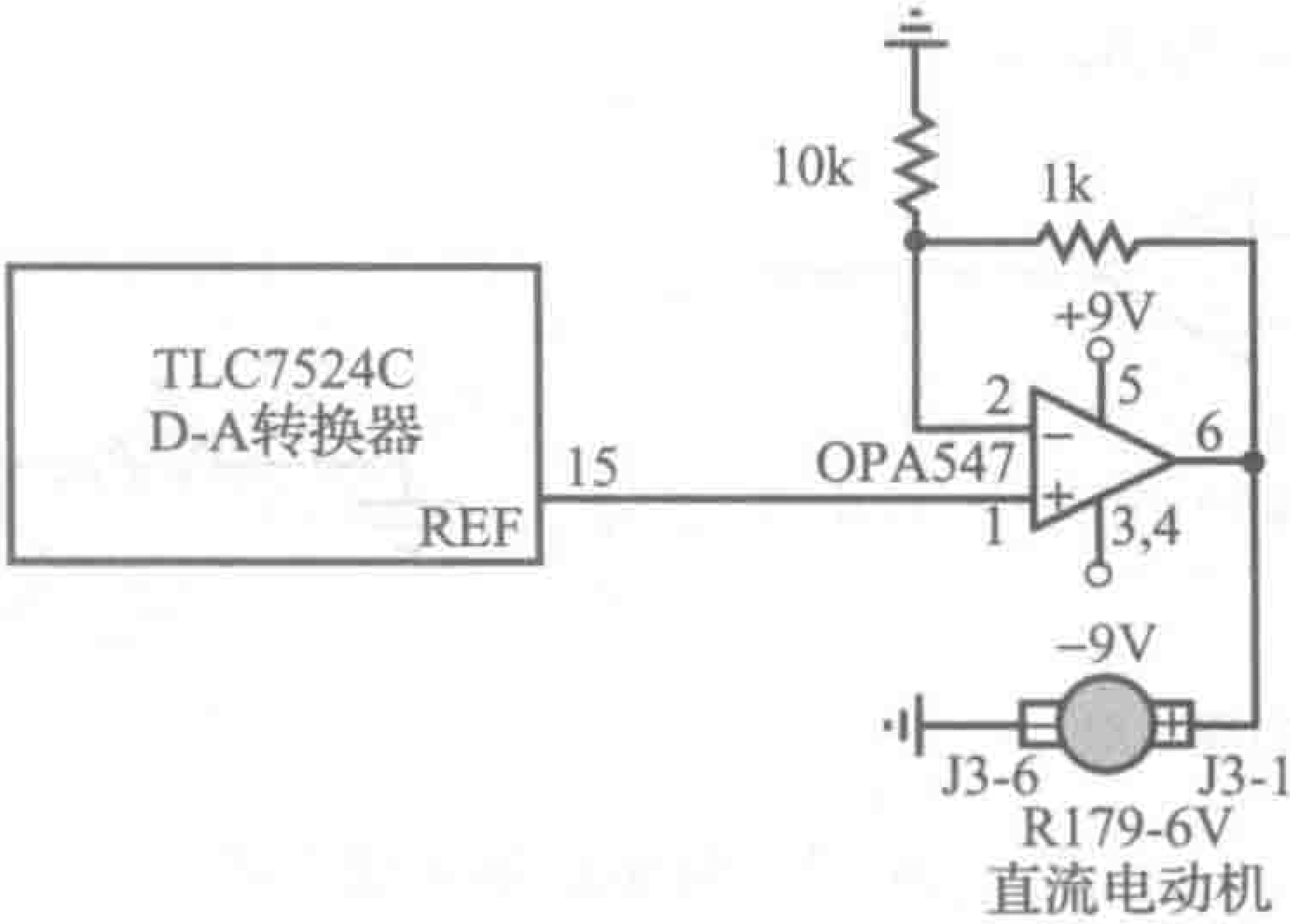
一个很好的正反馈例子是吉米·亨德里克斯将吉他靠近他的放大器扬声器时的效果。描述该技术的作用并解释发生了什么。

渐进设计实例 A.3　直流电动机功率运算放大器速度控制器——功率放大电动机驱动器

下图显示了渐进设计实例 A 的功能图(参见 1.3 节和视频演示 1.6)，其中描述的部分已突出显示。



D-A 转换器输出的电压直接与电位器的位置相关。但 D-A 转换器的输出电流是有限的，不足以驱动电动机。把功率运算放大器电路设置为同相放大器可以用较高的电流驱动电动机。实际上，功率放大器为 D-A 转换器和电动机之间的缓冲器。下面的电路显示了使用的元器件及其互连。如图所示，OPA547 可以由双极(±)9V 电源供电(而不是标准双极 15V 电源)。在视频演示 1.6 中，展示了如何使用标准的实验室电源或串联连接两节 9V 电池来创建这些电压。用 10kΩ 的输入电阻和 1kΩ 的反馈电阻，由式(5-17)可得功率放大电路的增益为 1.1。因此，来自 D-A 转换器的电压不会大幅放大，但是该电路能够向电动机提供足够的电流。输出大电流的运放组件称为功率运算放大器。OP547 就是一款这样的运算放大器。与所有设计实例一样，如果想了解所用元器件的更多信息，请参阅网络链接 1.4～1.6。



5.7　加法器

图 5-13 所示的加法器运放电路用于模拟信号的加法运算。用

$$R_1 = R_2 = R_F \tag{5-18}$$

分析电路可得(见问题 5.8)：

$$V_{out} = -(V_1 + V_2) \tag{5-19}$$

因此，电路输出是输入的负总和。

图 5-13　加法器电路

5.8　差分放大器

图 5-14 所示的**差分放大电路**用于模拟信号的减法运算(见实验练习 6)。在分析该电路时可以用**叠加原理**，即当多个输入应用于线性系统(如一个运算放大器电路)时，可以分析电路并确定每个输入单独的响应，单个响应之和等于多个输入的总体响应。具体来说，当输入是理想电压源时，为了分析由于一个源引起的响应，其他源应短路。如果一些输入是电流源，则它们将用开路替代。

分析图 5-14 所示电路的第一步是用短路替代 V_2，并且 R_2 要接地。如图 5-15 所示，其结果是反相放大器(见图 5-7 和课堂讨论项目 5.1)。因此，根据式(5-11)，对应输入 V_1 的输出是：

$$V_{out_1} = -\frac{R_F}{R_1} V_1 \tag{5-20}$$

分析图 5-14 的第二步是用短路替代 V_1，并且 R_1 要接地，如图 5-16a 所示。该电路的等价电路如图 5-16b，输入电压为：

$$V_3 = \frac{R_F}{R_2 + R_F} V_2 \tag{5-21}$$

因为 V_2 由电阻 R_F 和 R_2 分压了。

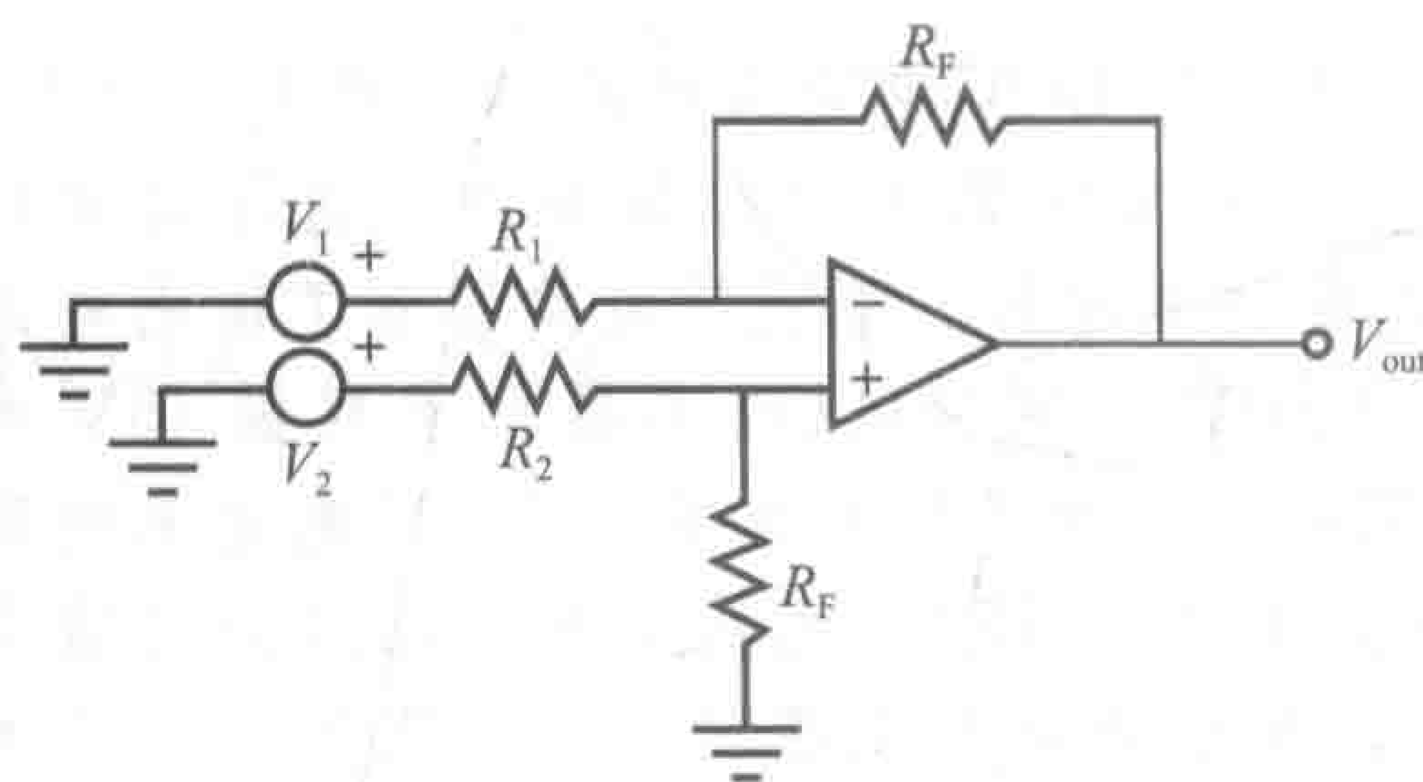


图 5-14　差分放大器电路

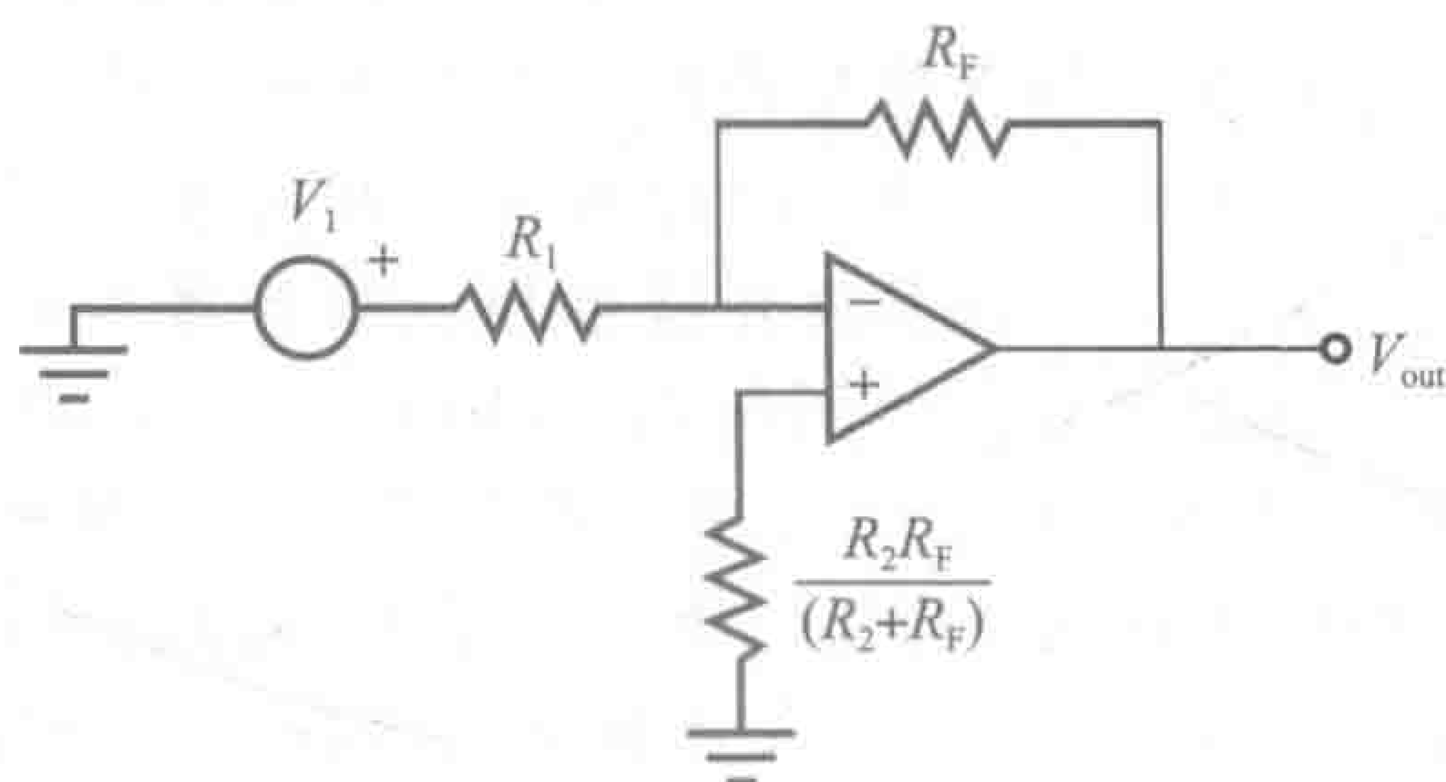
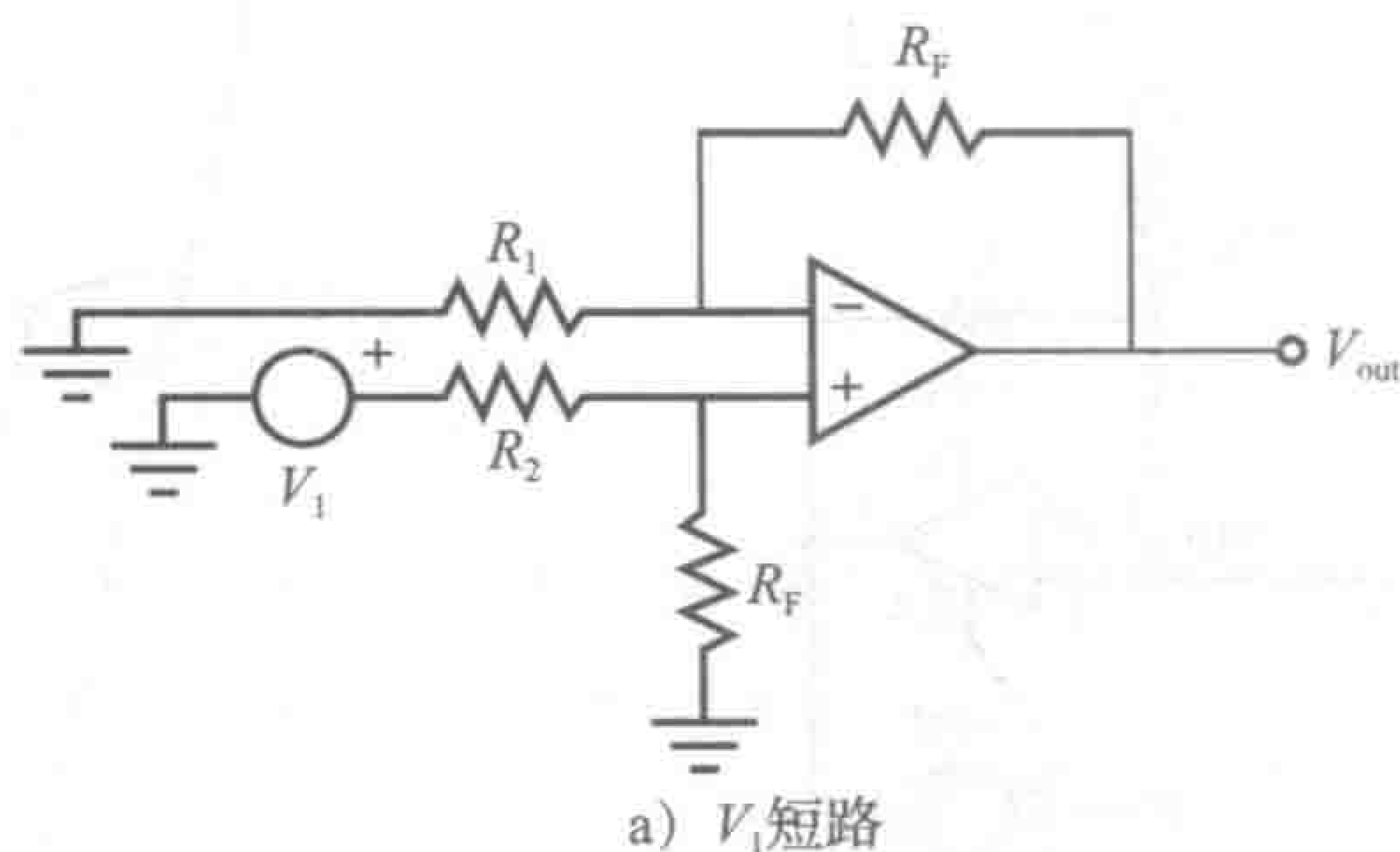
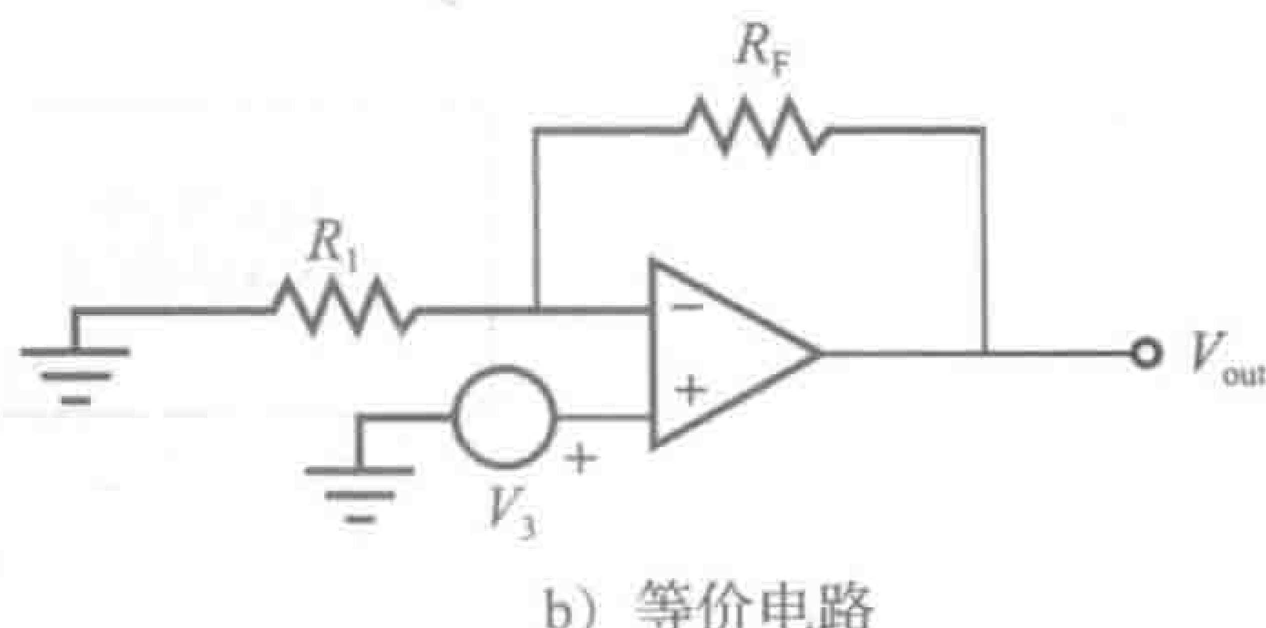


图 5-15　V_2 短路的差分放大器



a) V_1短路



b) 等价电路

图 5-16　V_1 短路的差分放大器

图 5-16b 所示的电路是同相放大器(见图 5-10)。因此，对应 V_2 输入的输出由式(5-17)可得：

$$V_{out_2} = \left(1+\frac{R_F}{R_1}\right)V_3 \tag{5-22}$$

代入式(5-21)，该式可以改写为：

$$V_{out_2} = \left(1+\frac{R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_F}{R_2+R_F}\right)V_2 \tag{5-23}$$

叠加原理描述了总输出 V_{out} 是各个输入对应输出的总和：

$$V_{out} = V_{out_1}+V_{out_2} = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right)V_1+\left(1+\frac{R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_F}{R_2+R_F}\right)V_2 \tag{5-24}$$

当 $R_1=R_2=R$ 时，输出电压是输入电压的差分放大：

$$V_{out} = \frac{R_F}{R}(V_2-V_1) \tag{5-25}$$

采用运算放大器的规则、基尔霍夫电流定律和欧姆定律也可以得到这个结果(见问题 5.10)。

5.9　测量放大器

5.8 节中给出的差分放大器对于低阻抗源可能是满意的，但对于高输出阻抗源而言它的输入阻抗太低。此外，如果输入信号是非常低，并且包括噪声，该差分放大器无法提取令人满意的差分信号。此问题的解决方案是使用**测量放大器**，它具有以下特点：

- 十分高的输入阻抗。
- 大的**共模抑制比**(CMRR)，该共模抑制比是差模增益与共模增益的比值。**差模增益**是对输入信号之间差的放大系数，**共模增益**是输入信号平均的放大系数。对于理想的差分放大器，共模增益为 0，这意味着共模抑制比无限大。当共模增益不为零时，若输入相等的非零值时输出不为零。所以期望使共模增益最小以抑制两个输入共同的信号，如噪声。
- 在噪声环境下可放大低电平信号，这通常是差分输出传感器信号调理的要求。
- 在大的增益范围内带宽一致。

测量放大器有商用的单片 IC(例如，美国模拟器件公司的 524 和 624 以及美国国家半导体的 LM 623)。单个外部电阻用于设置增益。该增益可以更高，并且比简单差分放大器的增益更稳定。

测量放大器也可以由廉价的分立运算放大器和精密电阻构成，如图 5-17 所示。分两部分来分析这个电路。左侧的两个运算放大器提供高阻抗放大器，其中每个输入分别放大，共模抑制比适中。输出 V_3 和 V_4 加在右侧的运算放大器电路中，它是一个差分放大器，电位器 R_5 用于最大化整个电路的共模抑制比。

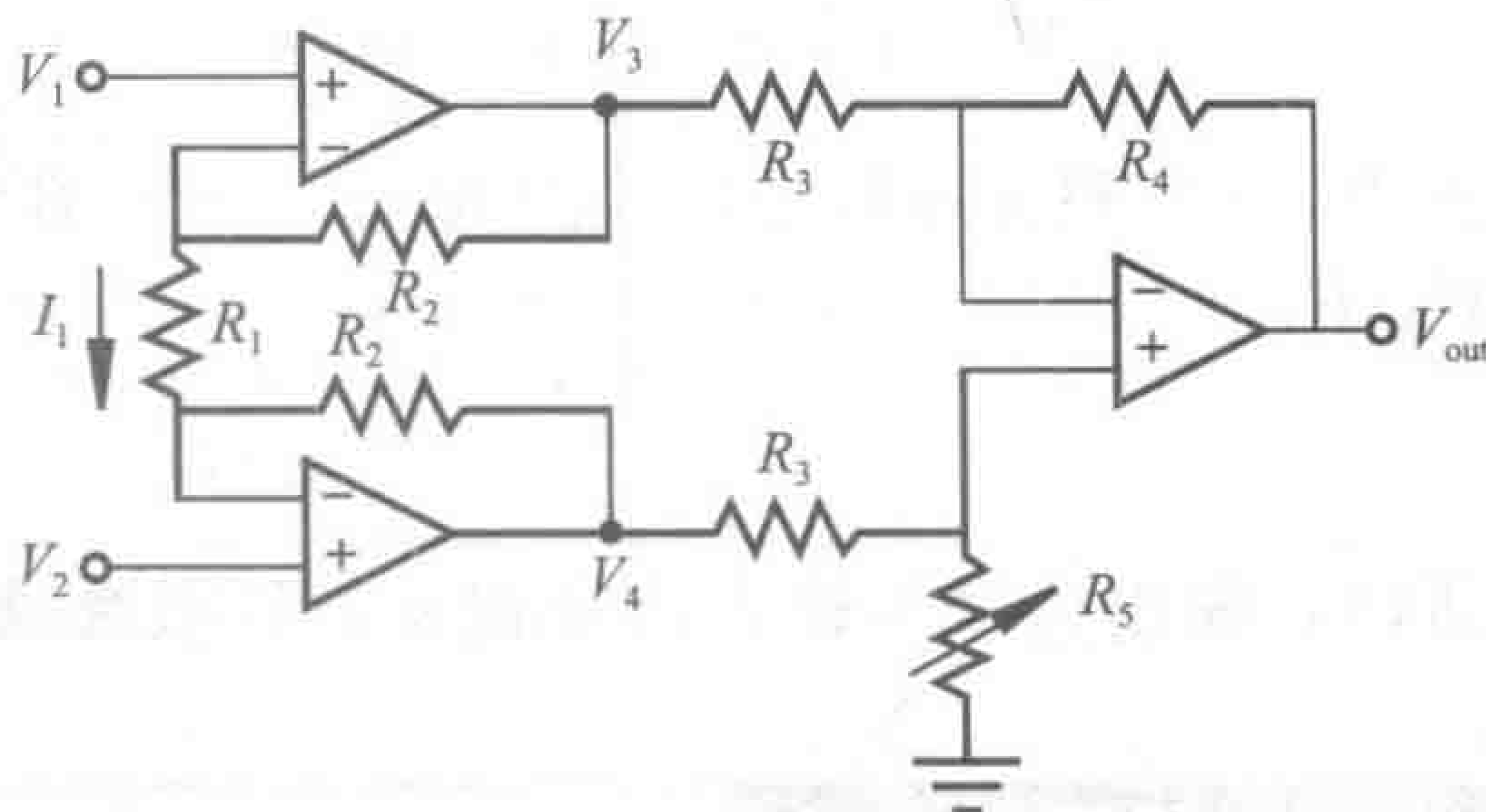


图 5-17　测量放大器

首先，应用基尔霍夫电流定律和欧姆定律于左边电路以用 V_1 和 V_2 表示 V_3 和 V_4，假设运算放大器均为理想运算放大器，很明显，电流 I_1 流过 R_1 和两个反馈电阻 R_2。对反馈电阻应用欧姆定律得

$$V_3 - V_1 = I_1R_2 \tag{5-26}$$

和

$$V_2 - V_4 = I_1R_2 \tag{5-27}$$

对 R_1 应用欧姆定律：

$$V_1 - V_2 = I_1R_1 \tag{5-28}$$

用 V_1 和 V_2 来表示 V_3 和 V_4，由式(5-28)消去 I_1 并代入式(5-26)和式(5-27)得：

$$V_3 = \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_1 - \frac{R_2}{R_1}V_2 \tag{5-29}$$

和

$$V_4 = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_2 \tag{5-30}$$

分析右侧电路，可以证明(见问题 5.12)：

$$V_{out} = \frac{R_5(R_3+R_4)}{R_3(R_3+R_5)}V_4 - \frac{R_4}{R_3}V_3 \tag{5-31}$$

把式(5-29)和式(5-30)中的 V_3 和 V_4 代入式(5-31)，用 V_1 和 V_2 来表示输出电压 V_{out}。假设 $R_5=R_4$，有：

$$V_{out} = \left[\frac{R_4}{R_3}\left(1+2\frac{R_2}{R_1}\right)\right](V_2-V_1) \tag{5-32}$$

测量放大器的设计目标是通过最小化共模增益实现最大化共模抑制比。对应的共模输入 $V_1=V_2$，由式(5-32)得输出电压 $V_{out}=0$。因此，共模增益为 0，如果 $R_5=R_4$ 则共模抑制比无穷大。实际中，电阻从未完全匹配。同样，如果分立电路的温度发生变化，则电阻不匹配会进一步扩大。通过使用电位器 R_5，设计师可以最小化 R_5 和 R_4 之间的不匹配，获得最大共模抑制比。

分立元器件中的电阻匹配问题通过使用具有激光调阻器的单个测量放大器来避免。这些放大器有通常分立元器件不会获得的很高的共模抑制比。此外，通过选择合适的外部电阻 R_1 可以实现程控增益。

5.10　积分器

如果反相运算放大器电路的反馈电阻用电容取代，则结果就是一个**积分器**电路，如图 5-18 所示。分析反相放大器，式(5-9)改为电容电压与电流间的关系：

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{i_{out}}{C} \tag{5-33}$$

积分后得：

$$V_{out}(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i_{out}(\tau)d\tau \tag{5-34}$$

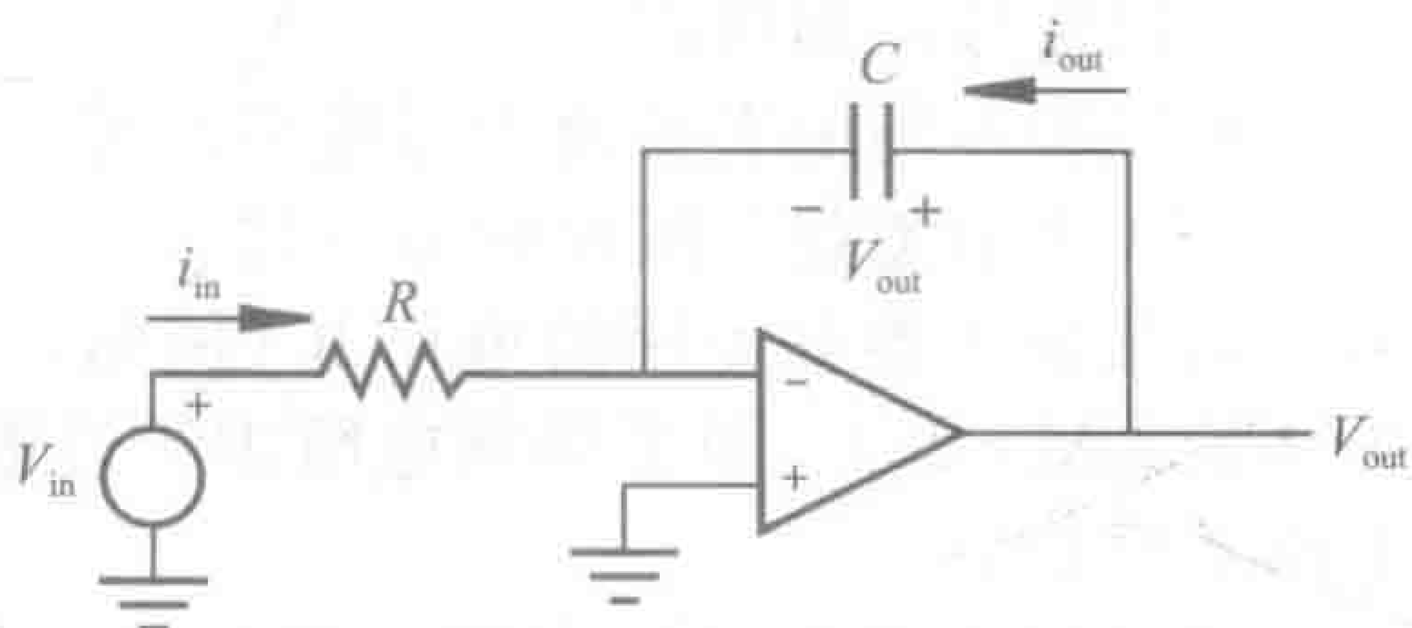


图 5-18　理想的积分器

式中，τ 是积分虚拟变量。因为 $i_{out}=-i_{in}$ 且 $i_{in}=V_{in}/R$，

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t V_{out}(\tau)d\tau \tag{5-35}$$

所以，输出信号与输入信号相反，且值是输入值的积分。

课堂讨论项目 5.4　　积分器性能

如果理想积分器的输入为直流电压，那么输出随时间怎样变化？输入为正弦，输出是什么？如果一个小的直流偏置加到正弦输入上，结果会怎样？

一个更实际的积分器电路如图 5-19 所示。与反馈电容并联的电阻 R_s 称为**分流电阻**。其目的是限制电路中的低频增益。这是必要的，因为输入端即使有很小的直流偏置也将在整个时间段积分，最终使运算放大器饱和(见 5.14 节和课堂讨论项目 5.7)。只有当总积分仍低于运算放大器的最大输出电压时积分器是有用的。一个好的经验法则是 R_s 大于 $10R_1$。

由于反馈电路的阻抗和频率响应包含 R_s 和 C，所以图 5-19 所示的电路只在一定的频率范围内才可作为积分器电路。对于很低的频率，反馈回路的阻抗为 R_s，低频时阻抗 C 很大，所以电路为一个反相放大器。对于很高的频率(即 $\omega \gg 1/R_1C$)，由于反馈回路事实为短路，输出趋近于 0。实验练习 6 和视频演示 5.5 探讨和演示了大频率范围内积分器的响应。

导致输入偏置电流的任何直流偏置(见 5.14.1 节)都可由 R_2 最小化，并且其值为输入和分流电阻的并联：

$$R_2 = \frac{R_1 R_s}{R_1 + R_s} \tag{5-36}$$

其原因是流入反相端的输入偏置电流是电流流过 R_1 和 R_s 的结果，流入同相端的输入偏置电流流过 R_2。如果由偏置电流产生的电压相同，则对输出没有影响。

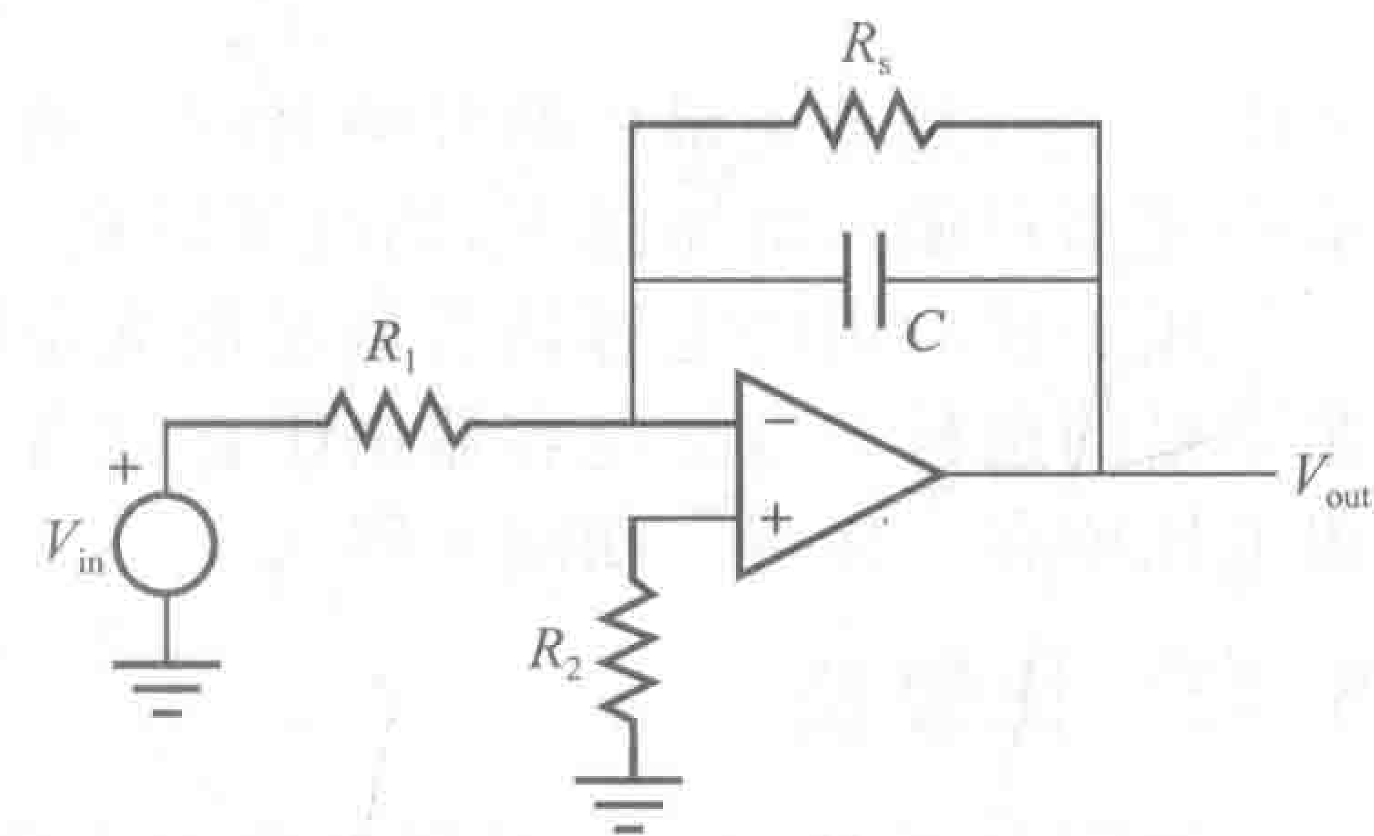


图 5-19 改进的积分器

5.11 微分器

如果反相运算放大器电路的输入电阻改为电容，其结果是一个**微分器**电路，如图 5-20 所示。参考反相放大器的分析，式(5-8)改为电容的电压和电流间的关系：

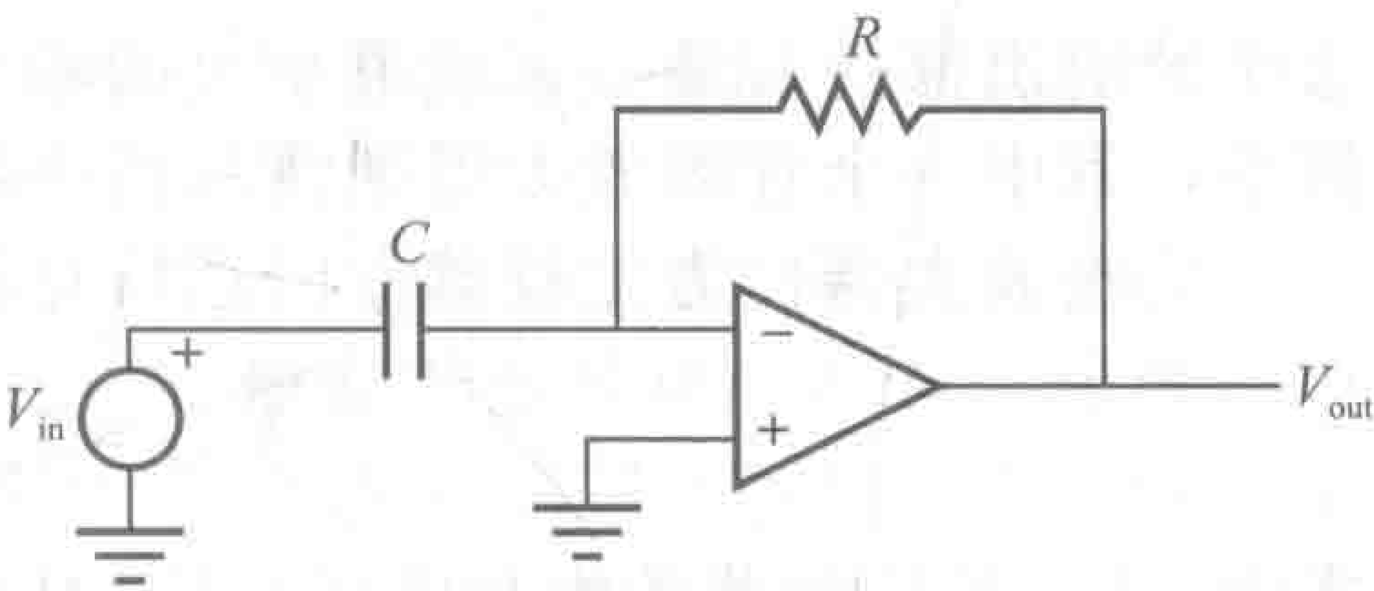


图 5-20 微分器

$$\frac{dV_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C} \tag{5-37}$$

因为 $i_{in} = -i_{out}$ 且 $i_{out} = V_{out}/R$，所以：

$$V_{out} = -RC\frac{dV_{in}}{dt} \tag{5-38}$$

因此，输出信号与输入信号符号相反，且结果是输入信号的导数。

在信号处理中使用微分器时需要注意，任何输入信号的电气噪声将会在输出中加重。实际上，微分器放大了快速变化的噪声。另一方面，积分有平滑作用，因此在积分器中不关注噪声问题。

课堂讨论项目 5.5 微分器的改进

对图 5-20 所示的微分器提出可能的改进之处。考虑输入信号中高频噪声的作用。

课堂讨论项目 5.6 积分器和微分器的应用

思考积分器和微分器电路的各种应用。考虑怎样用模拟计算机求解微分方程。考虑如何转化锯齿波和方波函数发生器的输出，以及如何处理位置和速度传感器信号。

5.12 采样和保持电路

采样和保持电路广泛用于模拟-数字转换中(见第 8 章讨论)，其中信号值必须稳定时才能转换为数字表示。采样和保持电路如图 5-21 所示，由电压-保持电容器和电压跟随器组成。当开关 S 闭合时

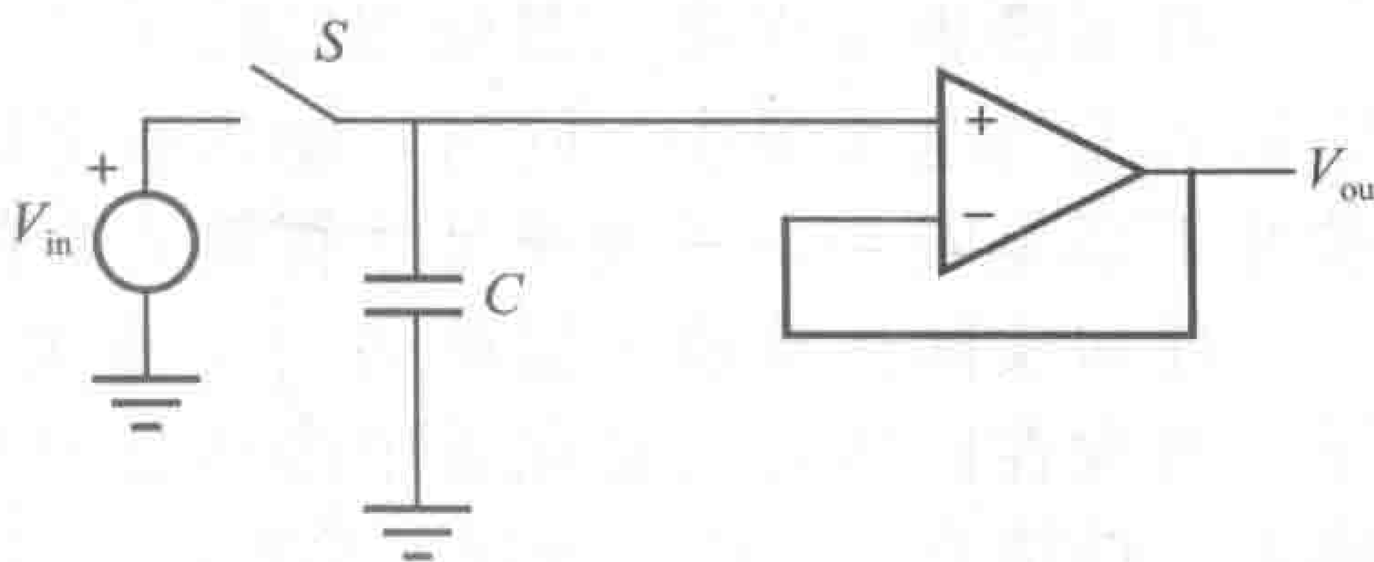


图 5-21 采样和保持电路

$$V_{out}(t)=V_{in}(t) \tag{5-39}$$

当开关断开时，电容器 C 保持为最后一个采样值对应的输入电压，因为这可以忽略电流跟随器的电流。因此

$$V_{out}(t-t_{sampled})=V_{in}(t_{sampled}) \tag{5-40}$$

式中，t_{sample}是开关最后断开的时间。通常，运算放大器使用的缓冲器位于开关的 V_{in}侧以最小化来自输入电压源 V_{in}的电流损耗。

用于该应用的电容器类型是很重要的。聚苯乙烯、聚丙烯等类型的低泄漏电流电容器是不错的选择。电解电容器由于它的高泄漏电流将是一个糟糕的选择。这种漏电会导致输出电压值在“保持”期间下降。

5.13 比较器

如图 5-22 所示，比较器电路用来确定是否一个信号大于另一个信号。**比较器**的一个例子是无负反馈的运算放大器电路和呈现无限增益的电路。结果是运算放大器**饱和**。饱和意味着输出保持其最大正或最小负的输出值。视频演示 4.2 给出了一个放大器饱和的有趣例子，其中一个音频放大器削波从传声器输出的声波。

某些放大器作为比较器专门运行在饱和区。比较器的输出定义为：

$$V_{out}=\begin{cases}+V_{sat}, & V_{in}>V_{ref}\\ -V_{sat}, & V_{in}<V_{ref}\end{cases} \tag{5-41}$$

式中，V_{sat}是比较器的饱和电压；V_{ref}是参考电压，用来与输入电压 V_{in}进行比较。正的饱和值略低于正电源电压，负的饱和值略高于负电源电压。

通常，比较器(如 LM339)是**集电极开路输出**的，输出状态由一个工作在截止或饱和状态的输出晶体管来控制。这种输出类型如图 5-23 所示，由于输出晶体管的集电极内部没有连接，需要外接驱动电路，故称为集电极开路输出。当 $V_{in}>V_{ref}$时，输出晶体管处于ON(饱和)状态，输出有效接地；当 $V_{in}<V_{ref}$时，输出晶体管处于 OFF(截止)状态，输出开路。

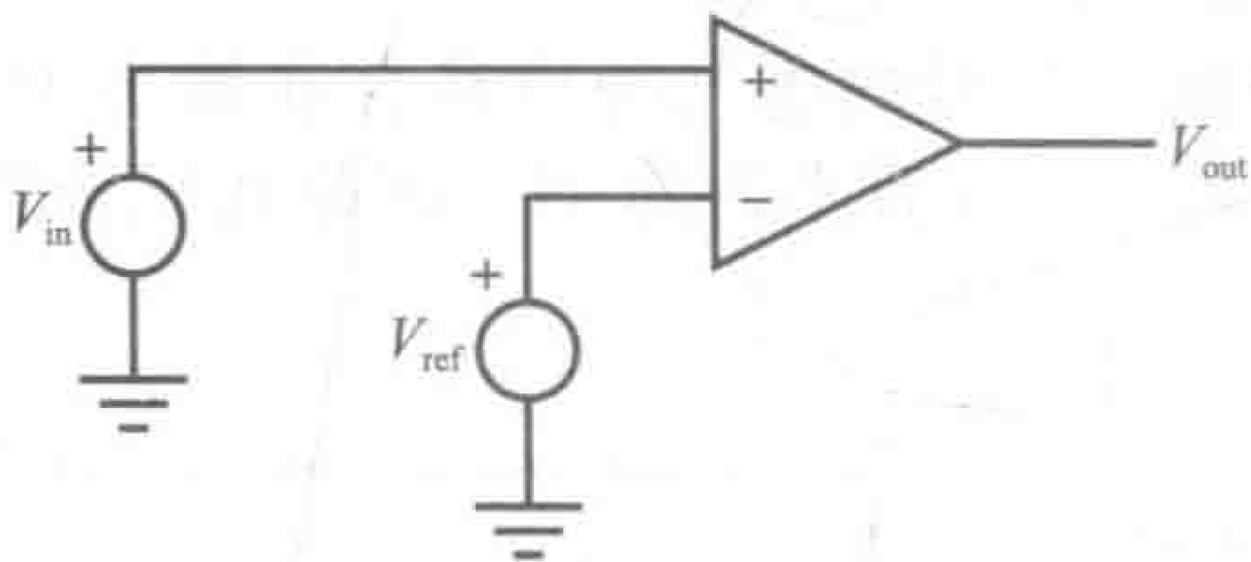


图 5-22 比较器

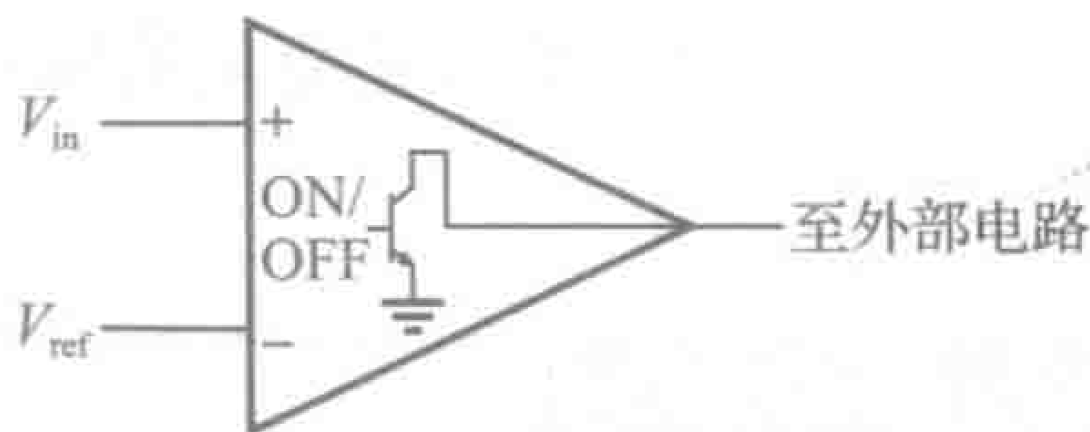


图 5-23 集电极开路比较器

5.14 实际的运算放大器

实际的运算放大器与理想运算放大器的特性有所偏差。熟悉 IC 的最好办法是查阅由制造商提供的数据手册中的规格。运算放大器和许多其他模拟 IC 的完整描述可以在网上或在制造商的数据手册中找到。一些比较重要的参数可以在运算放大器数据手册中找到，这在下一节中描述。

根据理想运算放大器模型的暗示可知，实际的运算放大器具有非常高的输入阻抗，所以输入端的电流很小。同时，输入端之间的电压差很小。然而，实际运算放大器的输入阻抗并不是无限大，其大小是运算放大器的一个重要的终端特性。

任何实际运算放大器的另一个重要的终端特性是可以从放大器中获得的最大输出电压。考虑在同相放大器配置中由外部电阻设置的增益为 100 的运算放大器电路。对于 1V 输入，期望有 100V 的输出。实际上，对于大负载阻抗的运算放大器，最大输出电压将比运算放大器的电源电压小 1.4V。因此，如果使用±15V 的电源，则最大输出电压大约为

13.6V，最小值为−13.6V。若尝试将输出驱动超出此范围则会导致饱和并限幅在最大输出电压摆幅内。

实际运算放大器的另外两个重要特性与其方波输入响应有关。当将方波作为放大器电路的输入时，理想情况下输出也是方波。但是，如图 5-24 所示，输出变化无法无限地快。相反，它从一个值到另一个值呈现为斜坡。为了量化运算放大器的阶跃响应，定义了两个参数：

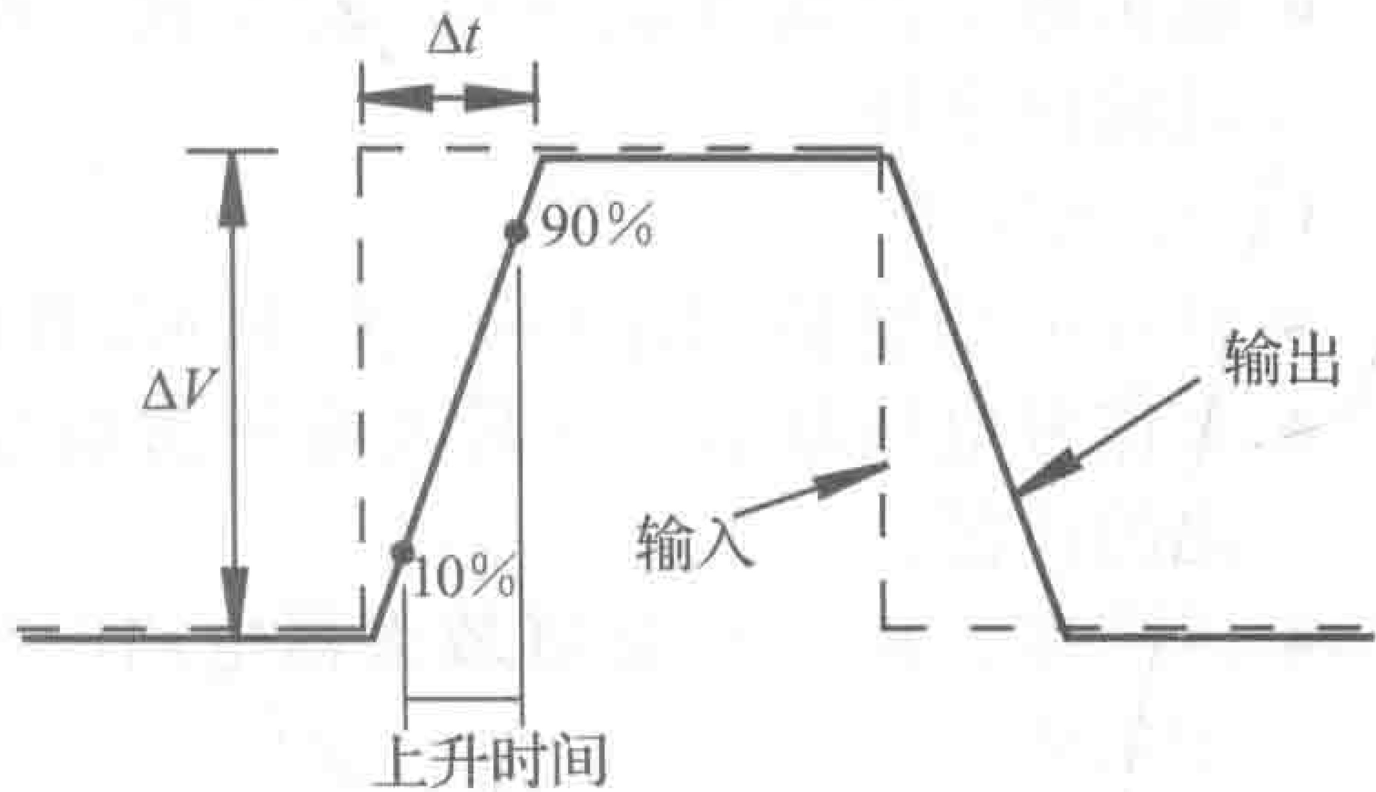


图 5-24　方波输入的压摆率效果

- **压摆率**——输出电压可能的最大时间变化率

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{5-42}$$

- **上升时间**——输出电压从最终值的 10%上升到 90%所需的时间。该参数由制造商根据特定的负载和输入参数来指定。

实际运算放大器的另一个重要特征是它的频率响应。理想运算放大器具有无穷大的带宽。然而，事实上，一个实际运算放大器具有有限的带宽，它是由外部元器件确定增益的函数。为了量化带宽对增益的依赖性，使用另一个定义：**增益带宽乘积**(GBP)。运算放大器的 GBP 是开环增益和此增益下带宽的乘积。GBP 在很宽的频率范围内是常数，如图 5-25 所示，因为典型的运算放大器在开环增益和频率间呈现线性对数关系。注意，运算放大器的增益随输入信号频率的增加而衰减。高质量的运算放大器具有大的 GBP 值。开环增益是运算放大器没有反馈时的特性。闭环增益是运放电路有反馈时的全部增益。闭环增益始终受到运算放大器开环增益的限制。例如，如图 5-25 所示，闭环增益为 100 的同相放大器将具有 0～约 10 000Hz 的带宽。在开环增益曲线上开始限制闭环增益的频率称为**跌落频率**。当增加电路增益时，就会限制了带宽。同样，如果只需要较小的带宽(例如，在低频应用中)，则可以使用较大的增益而无信号衰减或失真。

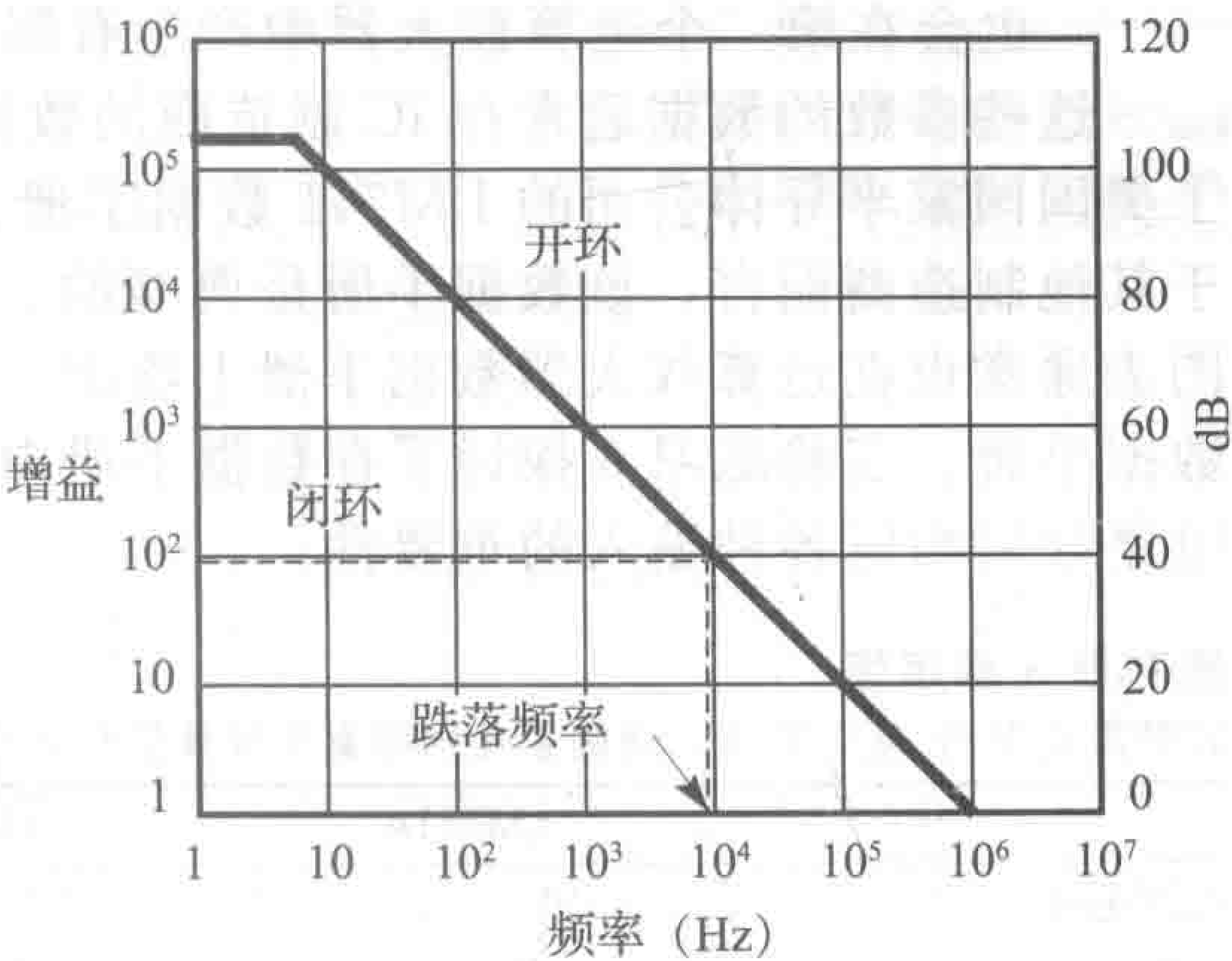


图 5-25　典型运算放大器的开环和闭环响应

运算放大器数据手册中的重要参数

用于描述实际运算放大器特性的大多数参数会在此处列出和描述。这些参数在设计和使用运算放大器电路时非常重要。

A. 输入常数

- 输入电压(V_{icm})——可以在任意输入和地之间施加的最大输入电压。一般来说，该电压等于电源电压。
- 输入失调电压(V_{io})——必须施加到其中一个输入端子上的电压，另一个输入为 0V，以提供零输出电压。请记住，对于理想的运算放大器，输出电压偏移为 0。
- 输入失调电流(I_{ib})——当输出电压为 0 时流入两输入端电流的平均值。理想情况下，两个输入电流为 0。
- 输入偏移电流(I_{io})——当输出电压为 0 时输入电流的差。
- 输入电压范围(V_{cm})——允许的共模输入电压范围，两个输入端的电压相同。
- 输入电阻(Z_i)——在其他输入接地的情况下向里看任意的输入电阻。

B. 输出常数

- 输出电阻(Z_{oi})——运算放大器输出电路的内阻。
- 输出短路电流(I_{osc})——运算放大器可以提供给负载的最大输出电流。
- 输出电压摆幅(V_{omax})——运算放大器在没有饱和或限幅的情况下可提供的最大峰-峰输出电压。

C. 动态常数

- 开环电压增益(A_{OL})——无外部反馈时运算放大器的输出与差分输入电压的比值。
- 大信号电压增益——最大电压摆幅与将输出从零驱动到指定电压所需的输入电压变化的比值。
- 压摆率(SR)——运算放大器电路的电压增益为1，输入为阶跃时，输出电压的时间变化率。

D. 其他常数

- 最大电源电压($\pm V_s$)——允许供给运算放大器的最大正负电压。
- 电源电流——运算放大器从电源中获取的电流。
- 共模抑制比(CMRR)——衡量运算放大器拒绝输入端等值信号的能力。它是差模增益(输出增益对应于输入间的差)与共模增益的比值(对应于两输入电压相同时的输出增益)，通常以分贝(dB)表示。
- 通道分离——只要单个封装中有多个运算放大器(如747运算放大器IC)，就会出现一定量的**串扰**。也就是说，即使没有直接连接，施加到一个运算放大器的输入信号也会在第二个运算放大器中产生有限的输出信号。

这些参数的数据通常在IC制造商的数据手册中可以找到，可在线获取。图5-26再现了美国国家半导体公司的LM741数据手册。它分为最大额定值部分和电气特性部分。对于其他制造商而言，该数据手册是典型的。图5-27给出了TL071的频率响应特性。这些图表通常也在运算放大器数据手册上给出。网络链接5.1和5.2指向741和TL071的完整数据手册。实验练习6探讨了在数据手册中报告的一些参数和信息对理解各种运算放大器电路如何响应各种输入的重要性。

绝对最大额定值

如果需要军用/航空器件，请联系美国国家半导体销售办事处/分销商了解其可用性和规格。[5]

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
电源电压	±22V	±22V	±22V	±18V
功耗[1]	500mW	500mW	500mW	500mW
差分输入电压	±30V	±30V	±30V	±30V
输入电压[2]	±15V	±15V	±15V	±15V
对地输出短路持续时间	连续	连续	连续	连续
工作温度范围	−55～+125℃	0～+70℃	−55～+125℃	0～+70℃
存储温度范围	−65～+150℃	−65～+150℃	−65～+150℃	−65～+150℃
结温	150℃	100℃	150℃	100℃
焊接信息				
N型封装(10s)	260℃	260℃	260℃	260℃
J型或H型封装(10s)	300℃	300℃	300℃	300℃
M型封装				
汽相(60s)	215℃	215℃	215℃	215℃
红外(15s)	215℃	215℃	215℃	215℃
表面贴将器件的其他焊接方法参见AN-450应用笔记“表面贴装方法及其对产品可靠性的影响”				
ESD耐压[6]	400V	400V	400V	400V

图5-26 运算放大器的数据手册(由美国国家半导体公司提供)

电压特性[3]

参数	条件	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			单位
		最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
输入失调电压	$T_A=25℃$										
	$R_S\leqslant10k\Omega$					1.0	5.0		2.0	6.0	mV
	$R_S\leqslant50\Omega$		0.8	3.0							mV
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$										
	$R_S\leqslant50\Omega$			4.0							mV
	$R_S\leqslant10k\Omega$						6.0			7.5	mV
平均输入失调电压漂移				15							μV/℃
输入失调电压调整范围	$T_A=25℃$，$V_S=\pm20V$	±10				±15			±15		mV
输入失调电流	$T_A=25℃$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$			70		85	500			300	nA
平均输入失调电流漂移				0.5							nA/℃
输入偏置电流	$T_A=25℃$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	μA
输入电阻	$T_A=25℃$，$V_S=\pm20V$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		MΩ
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$，$V_S=\pm20V$	0.5									MΩ
输入电压范围	$T_A=25℃$							±12	±13		V
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$				±12	±13					V
大信号电压增益	$T_A=25℃$，$R_L\geqslant2k\Omega$										
	$V_S=\pm20V$，$V_O=\pm15V$	50									V/mV
	$V_S=\geqslant15V$，$V_O=\pm10V$				50	200		20	200		V/mV
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$，$R_L\geqslant2k\Omega$										
	$V_S=\pm20V$，$V_O=\pm15V$	32									V/mV
	$V_S=\pm15V$，$V_O=\pm10V$				25			15			V/mV
	$V_S=\pm5V$，$V_O=\pm2V$	10									V/mV
输出电压摆幅	$V_S=\pm20V$										
	$P_L\geqslant10k\Omega$	±16									V
	$P_L\geqslant2k\Omega$	±15									V
	$V_S=\pm15V$										
	$P_L\geqslant10k\Omega$				±12	±14		±12	±14		V
	$P_L\geqslant2k\Omega$				±10	±13		±10	±13		V
输出短路电流	$T_A=25℃$	10	25	35		25			25		mA
	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$	10		40							mA
共模抑制比	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$										
	$R_S\leqslant10k\Omega$，$V_{CM}=\pm12V$				70	90		70	90		dB
	$R_S\leqslant50\Omega$，$V_{CM}=\pm12V$	80	95								dB
电源电压抑制比	$T_{AMIN}\leqslant T_A\leqslant T_{AMAX}$										
	$V_S=\pm200V$ 至 $V_S=\pm5V$										
	$R_S\leqslant50\Omega$	86	96								dB
	$R_S\leqslant10k\Omega$				77	96		77	96		dB
瞬态响应	$T_A=25℃$，单位增益										
上升时间			0.25	0.8		0.3			0.3		μs
超调量			6.0	20		5			5		%
带宽[4]	$T_A=25℃$	0.437	1.5								MHz
压摆率	$T_A=25℃$，单位增益	0.3	0.7			0.5			0.5		V/μs
电源电流	$T_A=25℃$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA

图 5-26　（续）

（续）

参数	条件	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			单位
		最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
电源消耗	$T_A=25℃$ $V_S=\pm20V$ $V_S=\pm15V$		 80	 150		 50	 85		 50	 85	 mW mW
LM741A	$V_S=\pm20V$ $T_A=T_{AMIN}$ $T_A=T_{AMAX}$			 165 135							 mW mW
LM741E	$V_S=\pm20V$ $T_A=T_{AMIN}$ $T_A=T_{AMAX}$			 150 150							 mW mW
LM741	$V_S=\pm15V$ $T_A=T_{AMIN}$ $T_A=T_{AMAX}$					 60 40	 100 75				 mW mW

①当工作于更高温度时，器件功率必须考虑其热阻和最大结温 T_{jmax}（见“绝对最大额定值”）。$T_j=T_A+(\theta_{jA}P_D)$。

热阻	Cerdip(J)	DIP(N)	HO8(H)	SO-8(M)
θ_{jA}（结至环境）	100℃/W	100℃/W	170℃/W	195℃/W
θ_{jC}（结至外壳）	N/A	N/A	25℃/W	N/A

②电源电压小于±15V 时，绝对最大输入电压等于电源电压。

③除非另有说明，否则这些电气特性的测量条件为 $V_S=\pm15V$，$-55℃\leqslant T_A\leqslant+125℃$（LM741/LM741A）。LM741C/LM741E 的电气特性限定为 $0℃\leqslant T_A\leqslant70℃$。

④计算公式：BW＝0.35/上升时间，其中 BW 的单位为 MHz，上升时间的单位为 μs。

⑤军用规格参见 RETS741X(LM741)和 RETS741AX(LM741A)。

⑥人体模型的阻抗为 1.5kΩ 电阻与 100pF 电容串联。

图 5-26　（续）

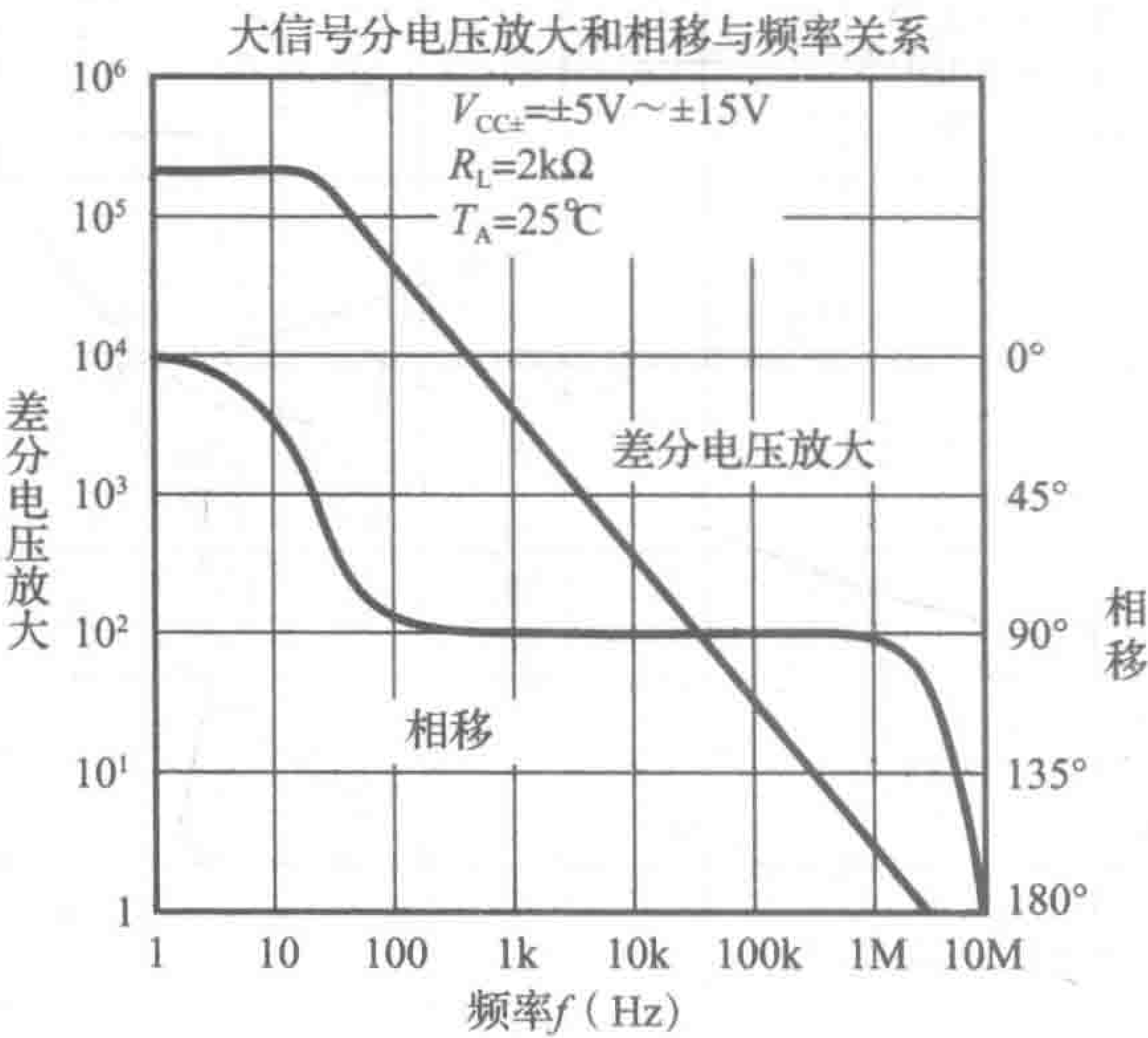


图 5-27　TL071 场效应晶体管输入运算放大器（由德州仪器提供）

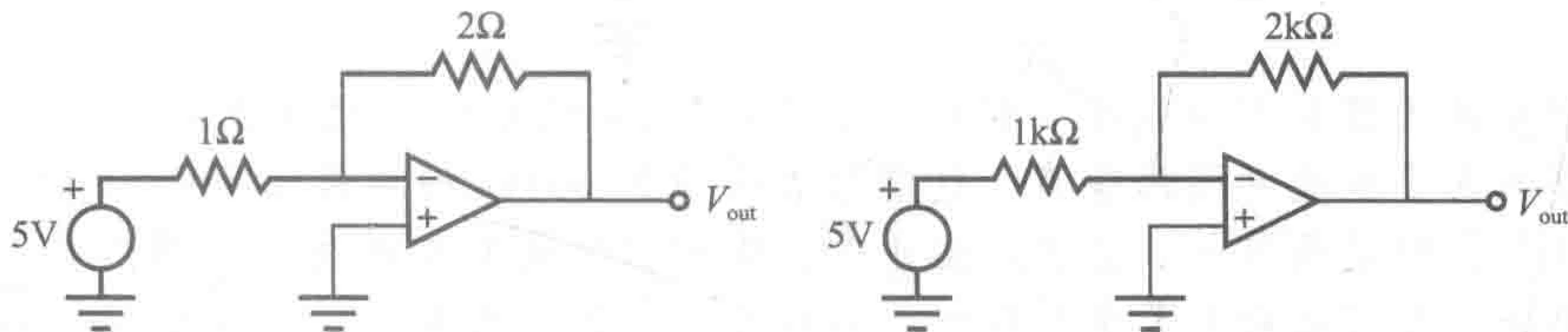
当具有运算放大器电路的实际经验后，应该了解影响运算放大器性能参数的重要性。

课堂讨论项目 5.7　　实际积分器的性能

思考课堂讨论项目 5.4，如果积分器由实际运算放大器构成，与理想积分器相比，输出会发生什么变化？

例 5.1　**在运算放大器电路中调整电阻**

运算放大器的理想模型意味着，如果在实验室中构建以下两个运算放大器电路，则它们将具有相同的增益。理想情况下，每个电路的增益为−2。然而，上面电路将是非常差的设计，并且不能发挥预期的作用。其原因可以通过考虑运算放大器规格表上的输出短路电流来找到。从图5-26可以看出，LM741的值通常为25 mA。这是输出可以达到的最大电流。但是，观察电路时，发现输出电流为$V_{out}/2\Omega$，因为$V_{out}=-2V_{in}=-10V$，输出电流为5A！这远远高于运算放大器能够提供的电流。为了避免这个问题，使用较大的电阻，如底部电路所示的电阻。这里，输出电流为5mA(10V/2kΩ)，完全符合运算放大器的规范。



设计实例 5.1　**假肢的肌原性控制**

假肢装置如何与人体接触是工程师感觉最有趣和最具挑战性的问题之一。这些问题在材料、流体、电子、控制和力学领域带来了许多医疗和工程方面的挑战。想想人造心脏、透析机、髋关节置换、渗透性皮肤贴片和人工视网膜等例子。随着开发改进的技术产品，可以发现它在生物工程中有非常重要的应用。考虑使用运算放大器知识是一个重要问题。

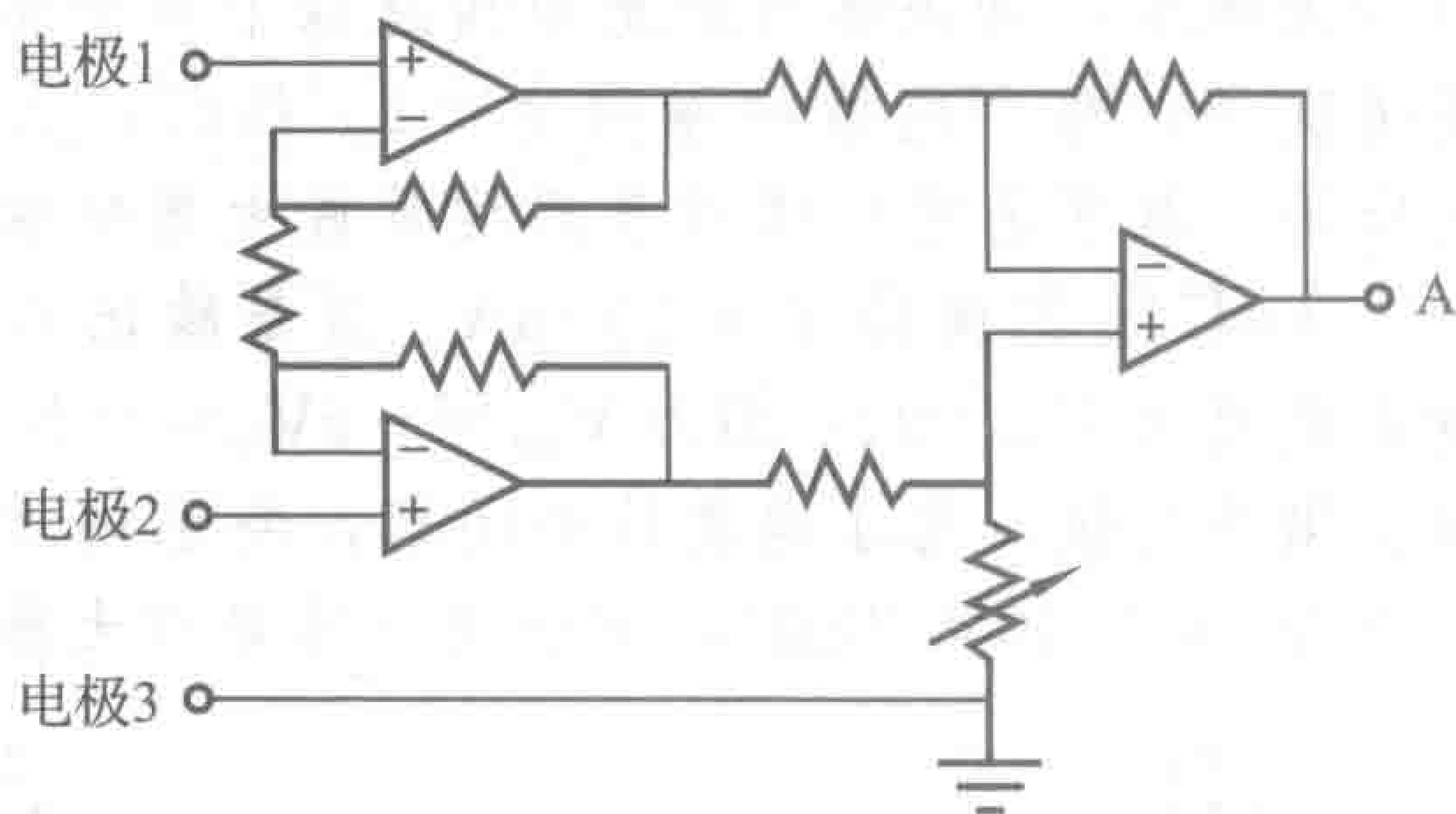
假设想设计一个可以通过佩戴者的想法来控制的假肢(例如，人造手臂或腿)。早期的假肢或者要么是被动的，要么通过收缩其他肌肉来进行某种机械控制。然而，一种新颖的方法将是对肢体提供思考控制。两种可能为神经控制或肌原性控制。对于神经控制，必须电击神经系统，这仍然是一个技术上尚未完全解决的问题。肌原控制更容易实现。当肌肉发生移动或抽搐时，皮肤下方肌肉中电解质的微小运动会导致皮肤表面引起有小电压的电场。这个电压是相当小的，否则我们每次触摸时都会相互电击。其范围从微伏到毫伏，并可与其他生物电位信号相混合。问题是感测和隔离这个小电压并将其转换成一个信号，使其能够切换到连接假肢的电动机。所以这里的问题是：如何设计使用肌肉表面的皮肤电位作为输入来控制执行器(如电动机)的机电一体化系统？

首先简述一下这个方法。首先，必须用特殊的表面电极去掉皮肤电位。然后，必须放大信号并对其进行滤波以消除不必要的噪声分量并实现正确的频率响应。这时，需要将其转换为允许控制策略设置不同级别的形式。最后，需要驱动大电流的电动机。你目前有设计能力来做所有这些事情。首先使用传感器来检测皮肤电位。

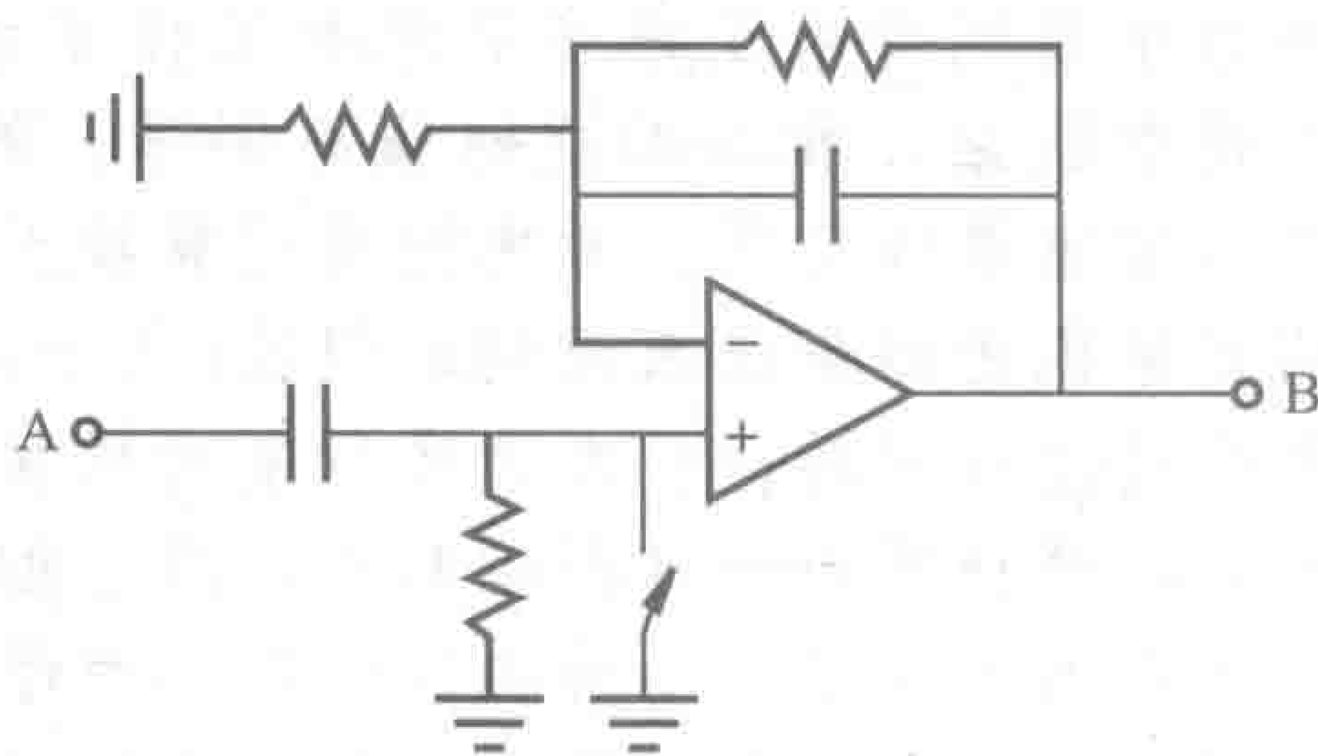
活体组织中出现的电场是由电解质中的电荷分离引起的，而不是由电子运动引起的。为了检测皮肤的电压，需要一个传感器将皮下(皮肤下面)的电解质离子电流转换成电子电流。银-氯化银电极具有这种性质。因此，如果将氯化银电极放置在皮肤上并与导电凝胶相连，可以感测身体在该位置的电压。电压的大小与皮下(皮肤下)肌肉收缩多少有关。该电压是感兴趣的肌原信号。剩下的问题是电极产生的信号非常小，最多只有几个毫伏。此外，相当多的频率为60Hz的背景噪声和其他信号可以掩盖与肌肉相关的信号。此外，电极-皮肤连接具有高阻抗。

这是测量放大器需要高输入阻抗、高共模抑制比和必要的增益以获得提取收缩肌肉生成生物电位信号的一种应用。下图给出了电肌原性(EMG)检测器的前置放大器。对于所示元器件，应该容易地创建超过60dB的共模抑制比，增益为125，输入阻抗为10 MΩ的

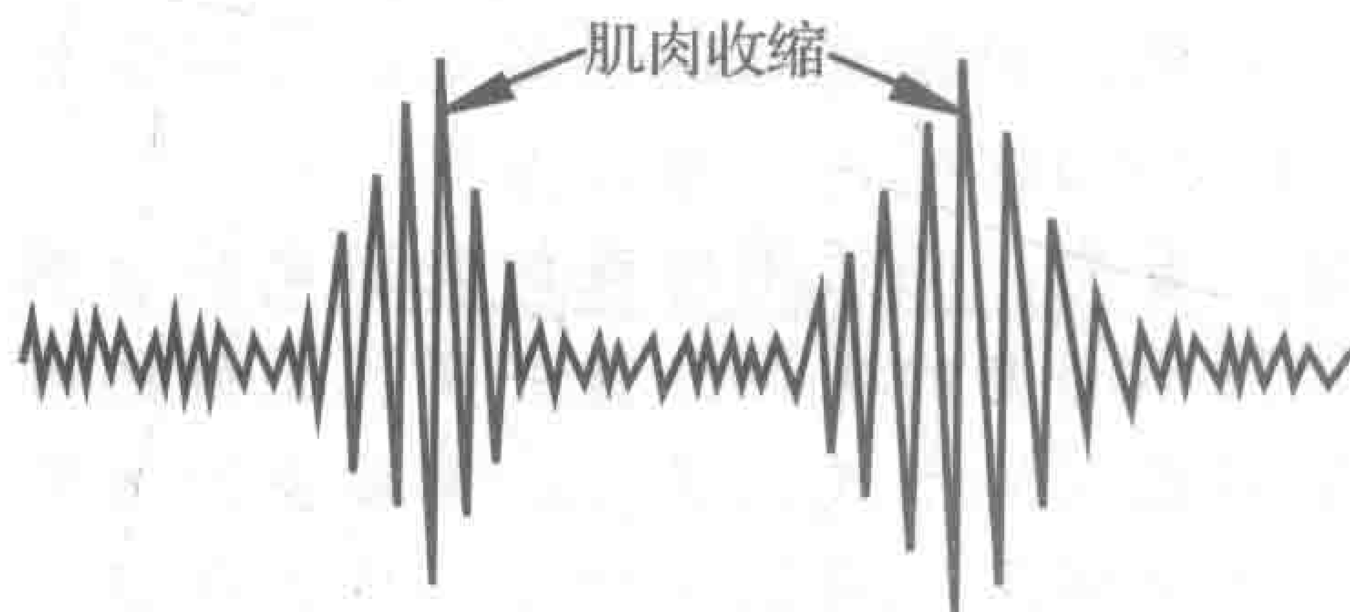
测量放大器。注意，两个有源(差分)电极 1 和 2 将紧密地贴在肌肉上方。电极 3 是地面参考。该电路在捕捉 EMG 信号方面有着令人满意的效果。



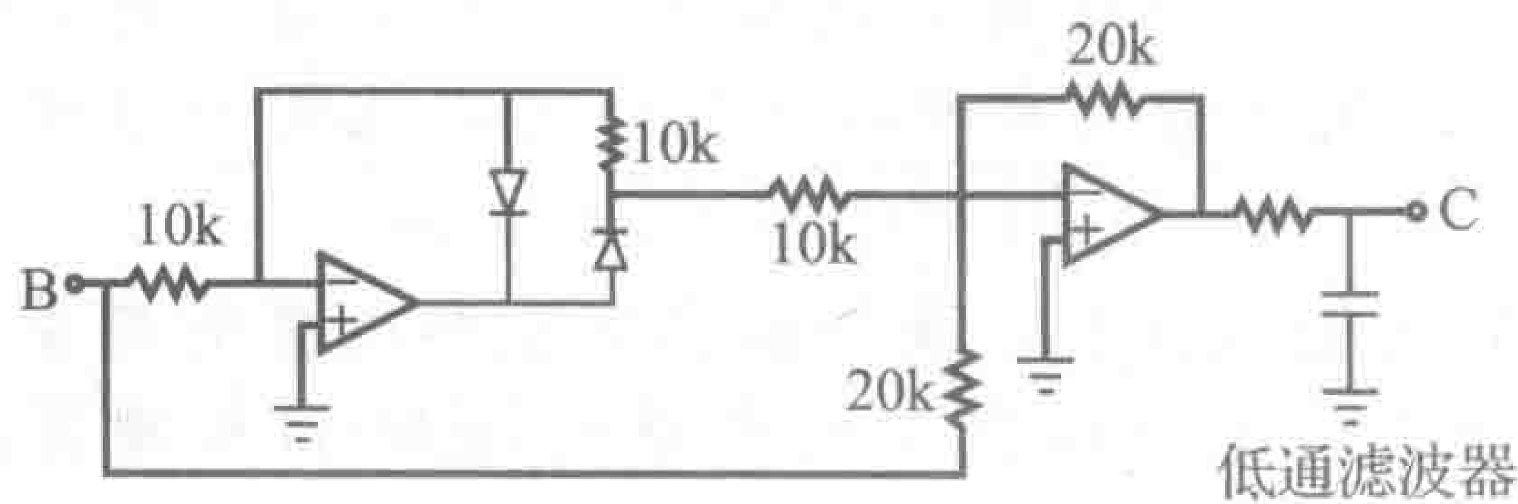
选择测量放大器是因为它可以在两个信号电极(电极 1 和 2)之间提取非常小的信号差，同时显著衰减两个电极共同的噪声。这消除了大量的 60Hz 的共模噪声(由电磁干扰产生)和两个电极共同的其他信号。然而，由于电极和组织之间的相对运动，仍然会发生名为运动伪影的事情。相对运动可产生足以使第二级放大器饱和的电压。运动伪影的频率通常处于 EMG 信号带宽的低端。因此，可以使用随后放大器的第二级输入端上 2Hz 的高通滤波器来减少这些伪影。信号“A”是测量放大器电路的输出，信号“B”是基于运算放大器的滤波器的输出。滤波电路是 RC 滤波器和同相放大器的组合。运算放大器反馈环路中的电容限制了高于感兴趣的频率处的增益。



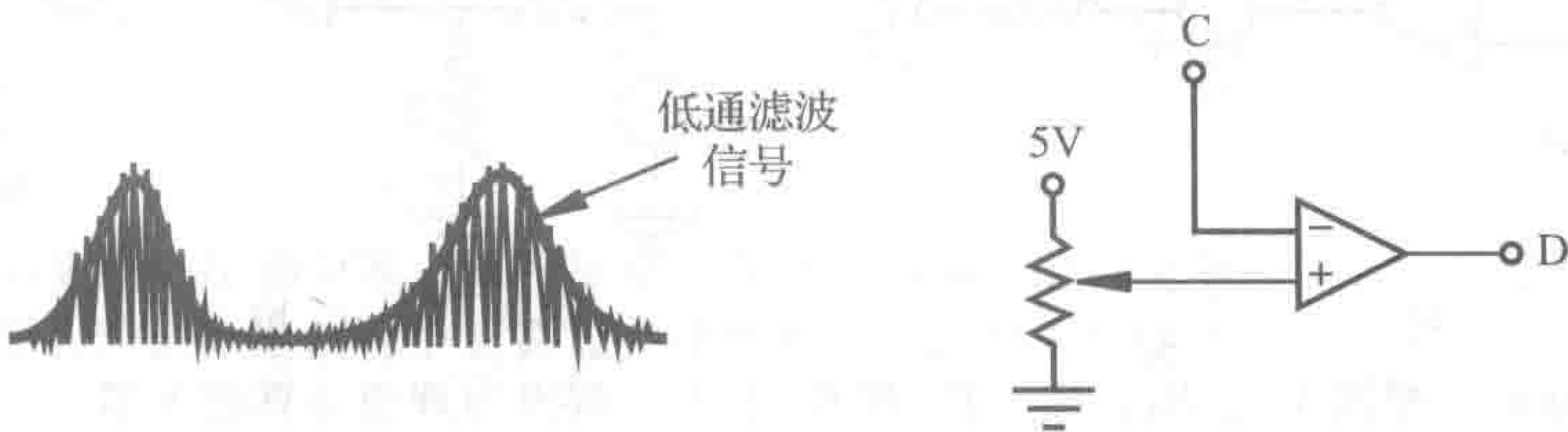
在这一点上，在示波器上观察到的 EMG 信号(信号“B”)如下图所示，其中大幅值脉冲与肌肉收缩相关联。



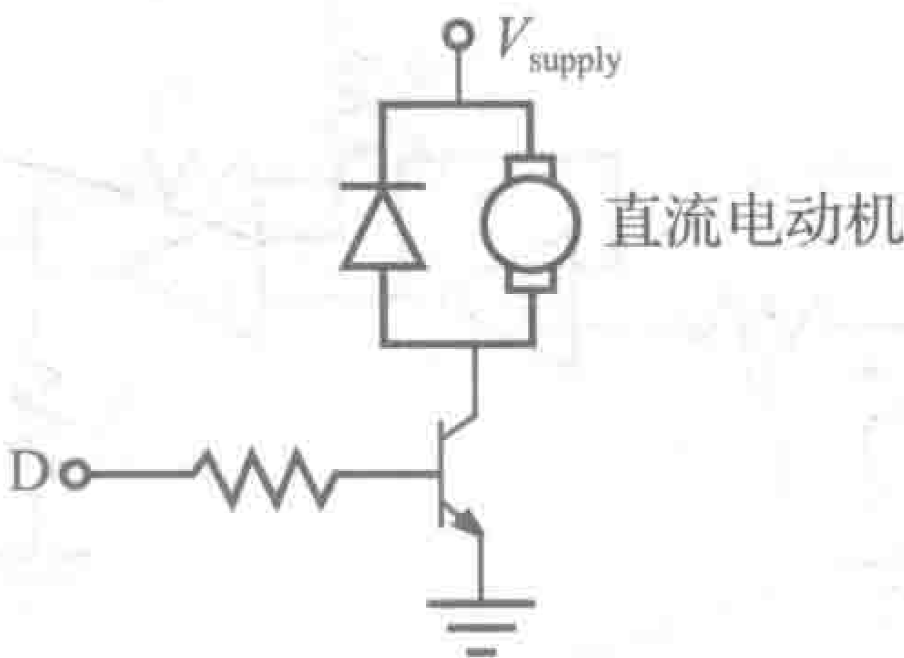
这是一个频率相当高的信号，其频率在几赫兹到 250Hz 之间。为了使该信号对于控制更有用，需要提取信号在 0V 和最大正幅值之间的包络。可以用整流器和低通滤波器来实现这一点。正常的硅二极管不能满足信号整流，因为它需要 0.7V 电压才能导通，这大于输入信号的幅值。因为信号非常小，所以必须使用更接近于理想二极管精度的精密整流电路(见下图)。



精密整流的EMG和所得到的低通滤波信号如下图所示。低通滤波信号基本上是整流信号的包络。现有一个可以输入到比较器的信号(见下图)从而提供一个二进制控制信号(信号"D"),当肌肉松弛时其为ON,肌肉收缩时其为OFF。设计师或用户可以使用电位器调整参考电压以达到所需的灵敏度。



如下图所示,将整流器的输出输入到功率晶体管电路中以控制电动机中的电流。



综上所述,已经使用各种运算放大器电路来处理模拟信号。列举了在存在噪声、各种模拟信号处理方法以及与执行器接口以控制机械功率的情况下提取电平非常低的信号。在这种情况下,已经将EMG信号转换成二进制控制信号用于直流电动机的开关控制,如可以在假肢臂中弯曲肘部。11.4节介绍了一个解决类似问题的更加完整和详细的方案,其中使用EMG信号来控制工业机器人。

课堂讨论项目5.8 **双向EMG控制器**

在设计实例5.1中,讨论了通过EMG信号打开和关闭电动机。但是,控制器只能在一个方向上驱动接头。讨论如何改变设计以允许双向移动。

问题和练习

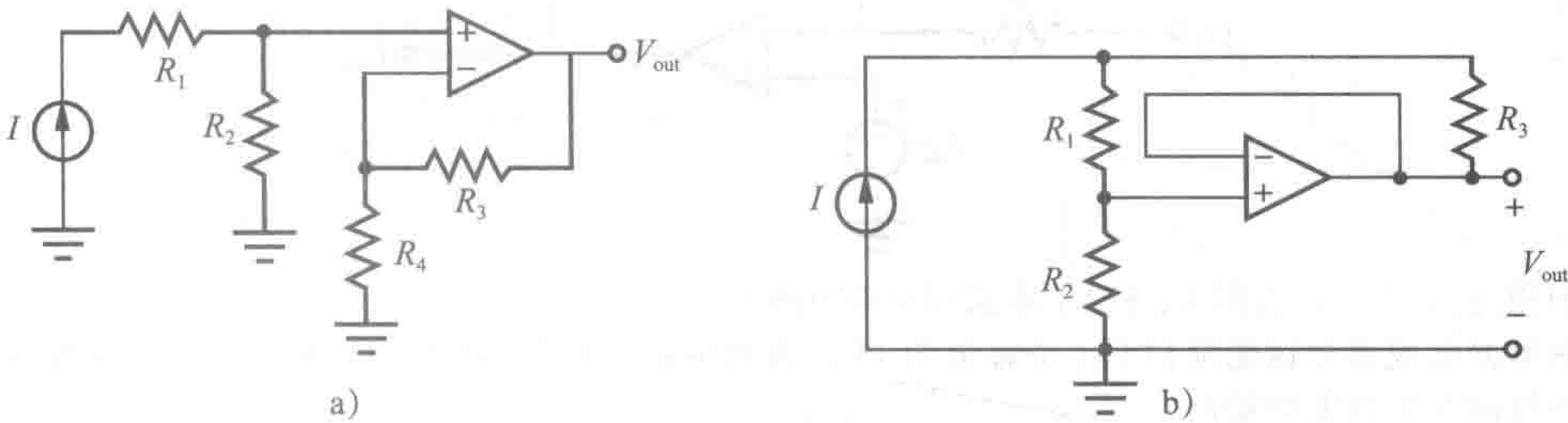
5.1 反相运算放大器电路的设计中有1/4W电阻(即它们能够消耗高达1/4W的能量而无故障)。如果输入电压为5V,增益分别为

a. 1

b. 10

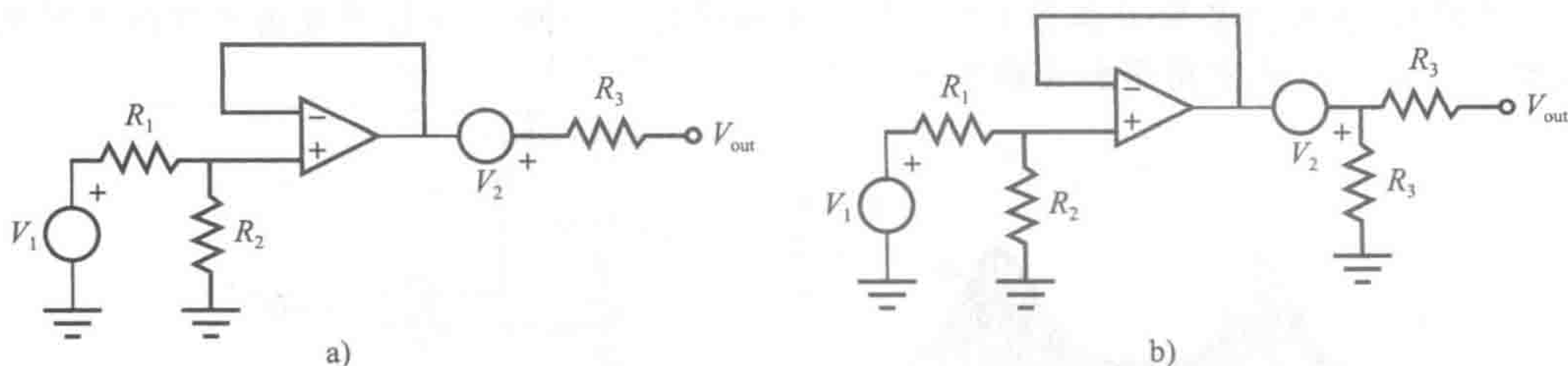
问:输入和反馈电阻的最小值是多少?

5.2 求V_{out}与I(由电流源提供)的函数关系,以及每个运算放大器电路的电阻值。假设为理想的运算放大器。

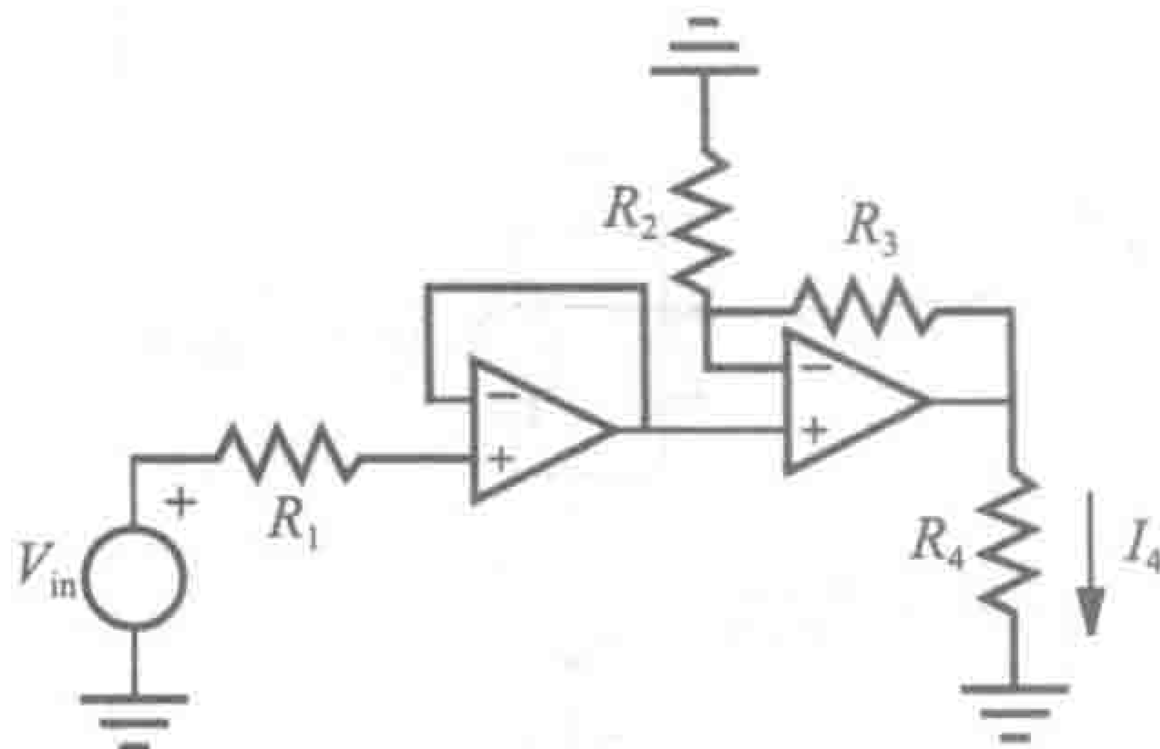


5.3　若图 5-10 中的电阻 R_F 短路(即 $R_F=0$)，求电路的增益。

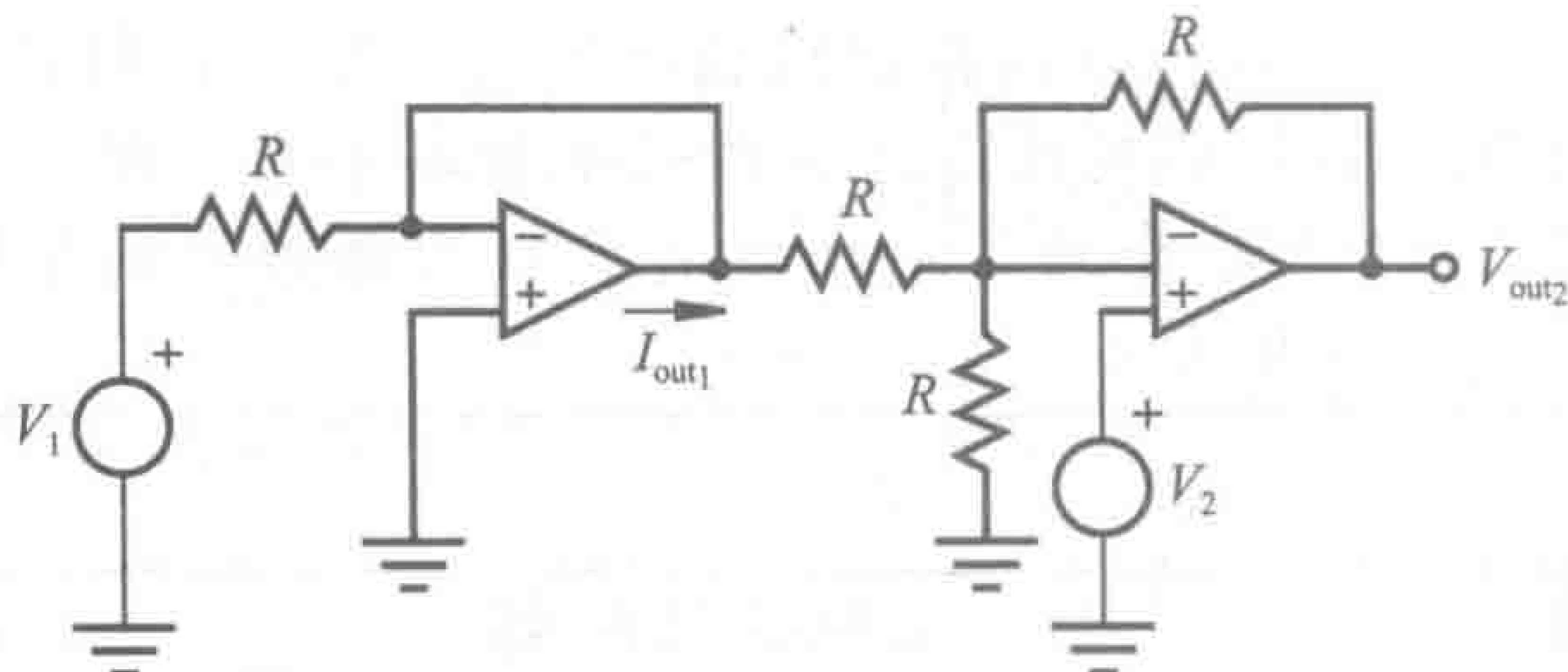
5.4　在下图电路中，当 $R_1=R_2=R_3=1k\Omega$、$V_1=10V$、$V_2=5V$ 时，求 V_{out}。假设为理想运算放大器。



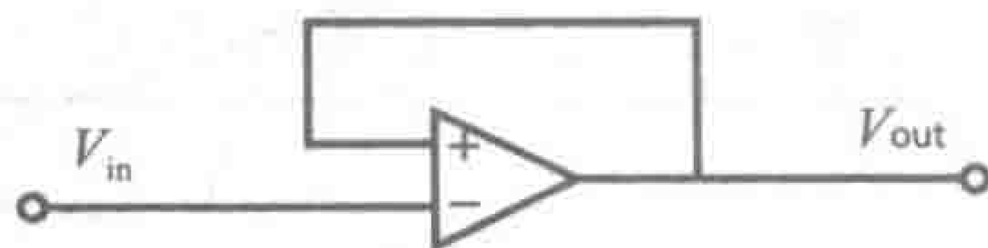
5.5　在下面的电路中，根据 V_{in}、R_1、R_2、R_3 和 R_4 求 I_4。假设为理想运算放大器。



5.6　电路如下所示，根据 V_1、V_2 和 R，求 I_{out1} 和 I_{out2}。



5.7　解释为什么在下面电路图中 $V_{out} \neq V_{in}$。

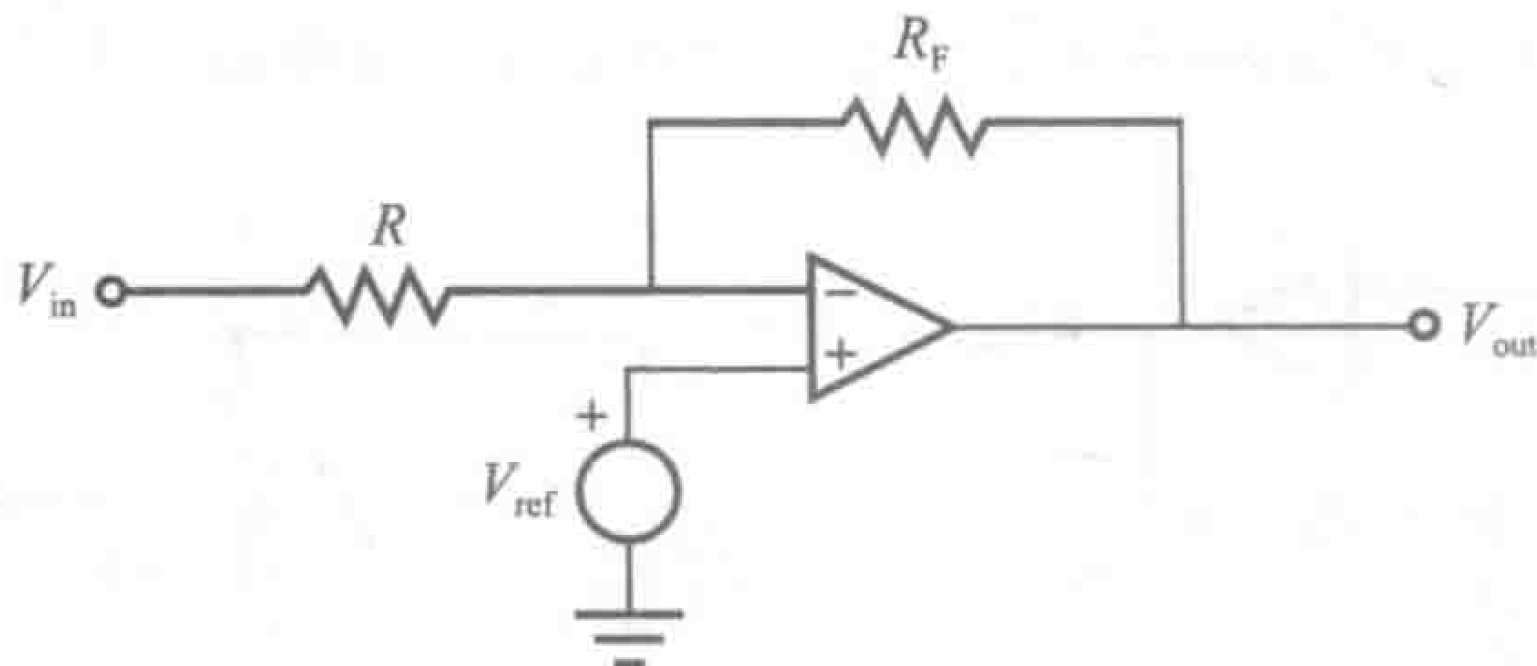


5.8　分析图 5-13 所示的加法电路，根据输入电压 V_1 和 V_2 以及电阻 R_1、R_2 和 R_F 求输出电压 V_{out}。使用此结果验证式(5-19)是否正确。展示和解释所有的计算步骤。

5.9　在图 5-13 所示的加法电路中，将电压源 V_3 插入到地与同相输入端之间，若 $R_1=R_2=R_F$，请根据输入电压 V_1 和 V_2 求输出电压 V_{out}。

5.10　不使用叠加原理，推导出式(5-24)给出的差分放大器公式。

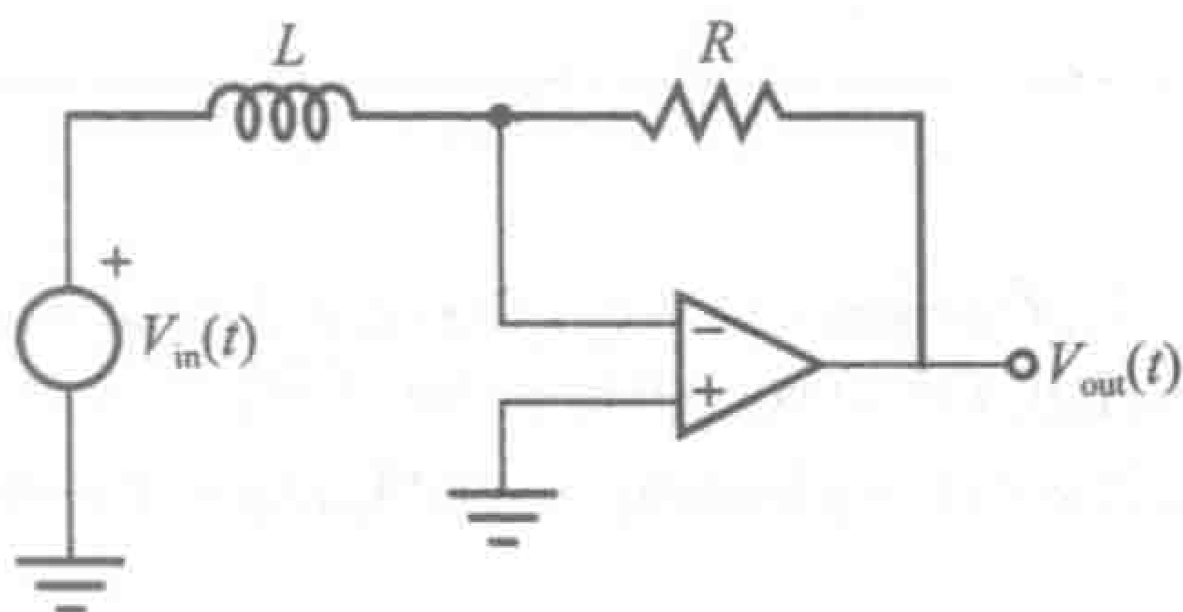
5.11　对以下电路，使用叠加原理推导输出电压的表达式，并解释为什么电路称为**电平转换器**。



5.12　如图 5-17 所示，根据 V_3 和 V_4 求式(5-31)中的 V_{out}。

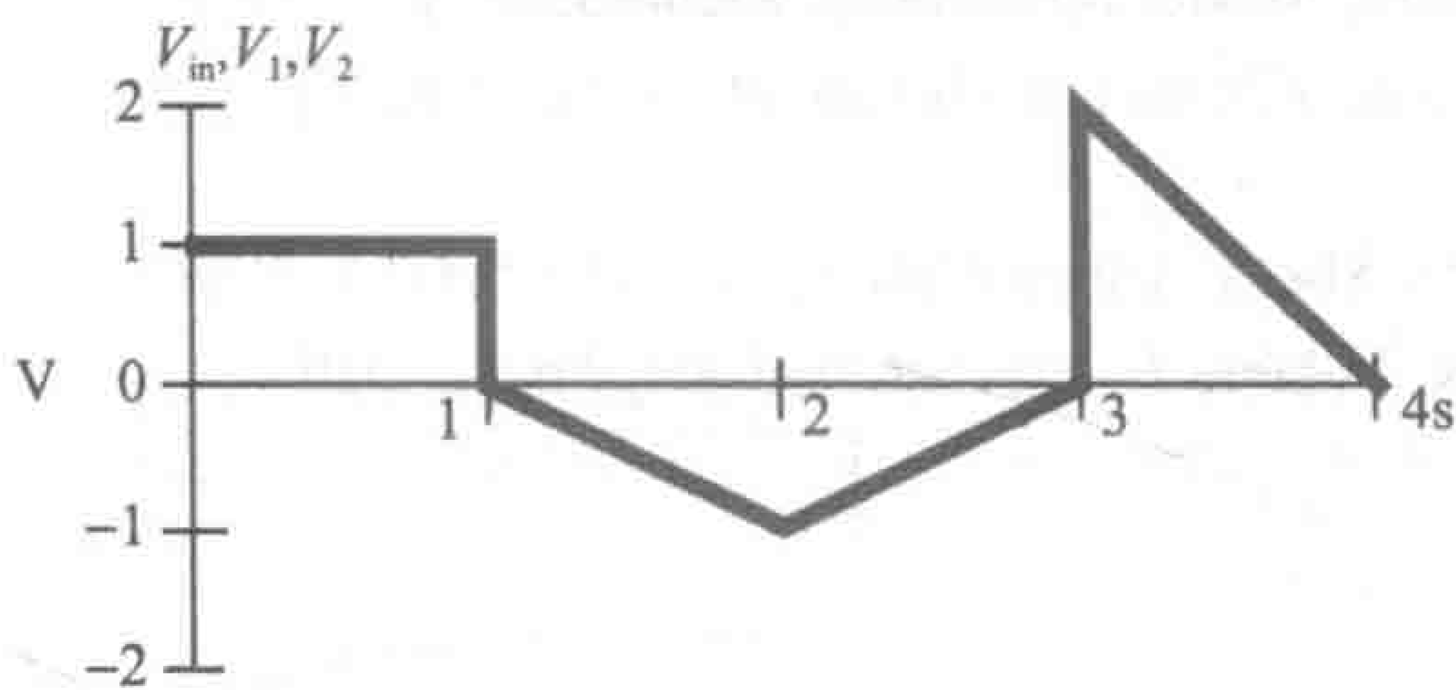
5.13　求解并生成课堂讨论项目 5.4 中幅值为 1V，直流偏移为 0.1V 的 100Hz 的正弦波。应绘制出正弦曲线的 5 个周期的输出。

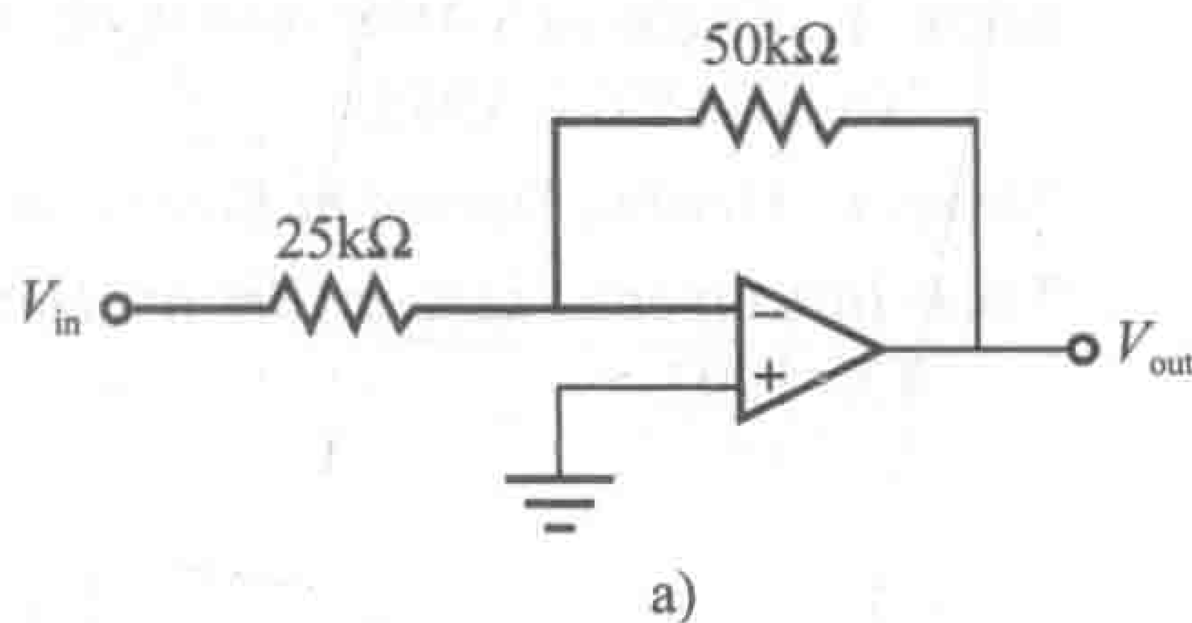
5.14　在如下所示运算放大器电路中，已知 $V_{in}(t)$ 求 $V_{out}(t)$。

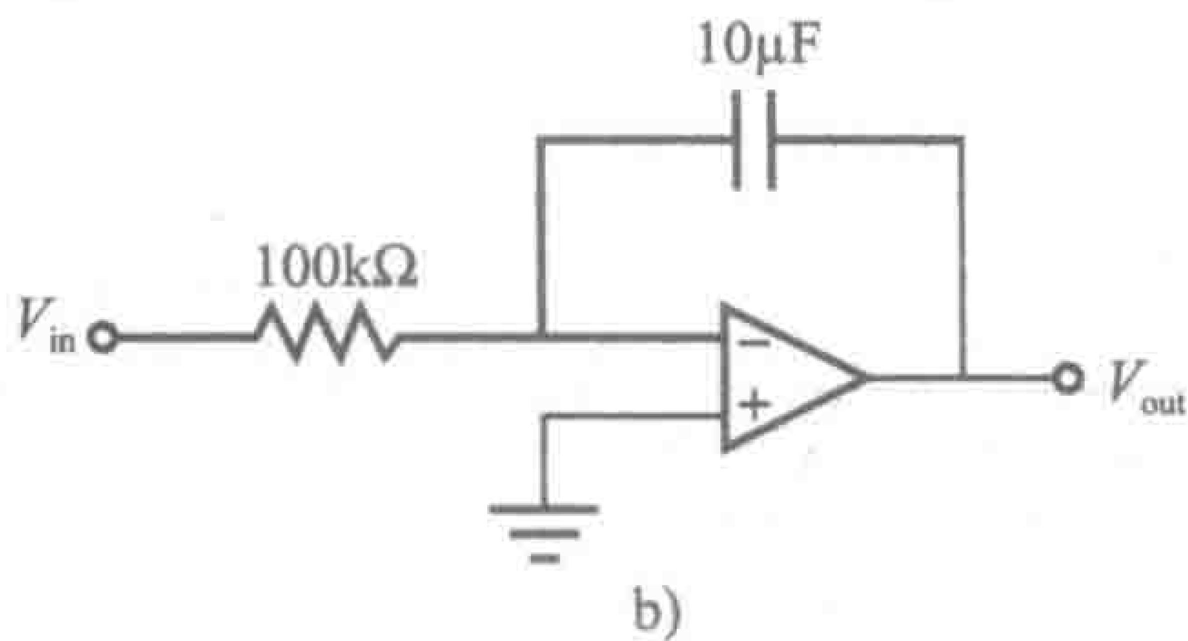


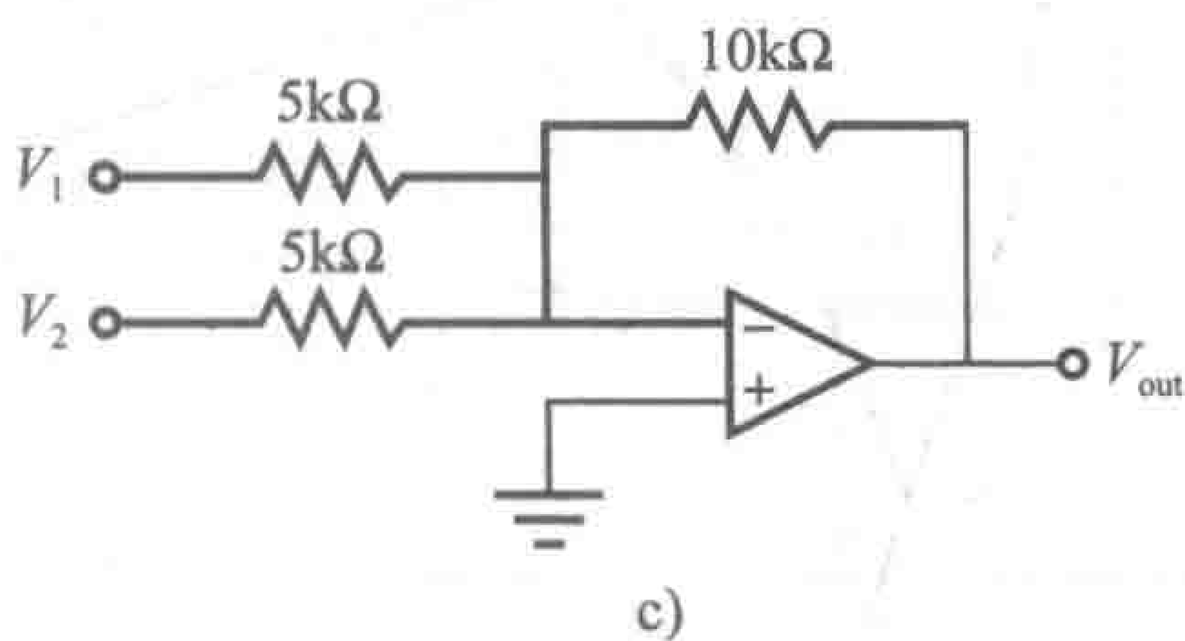
5.15　假设输入和输出电压都为零，流入每个运算放大器输入的电流都相等，推导式(5-36)。

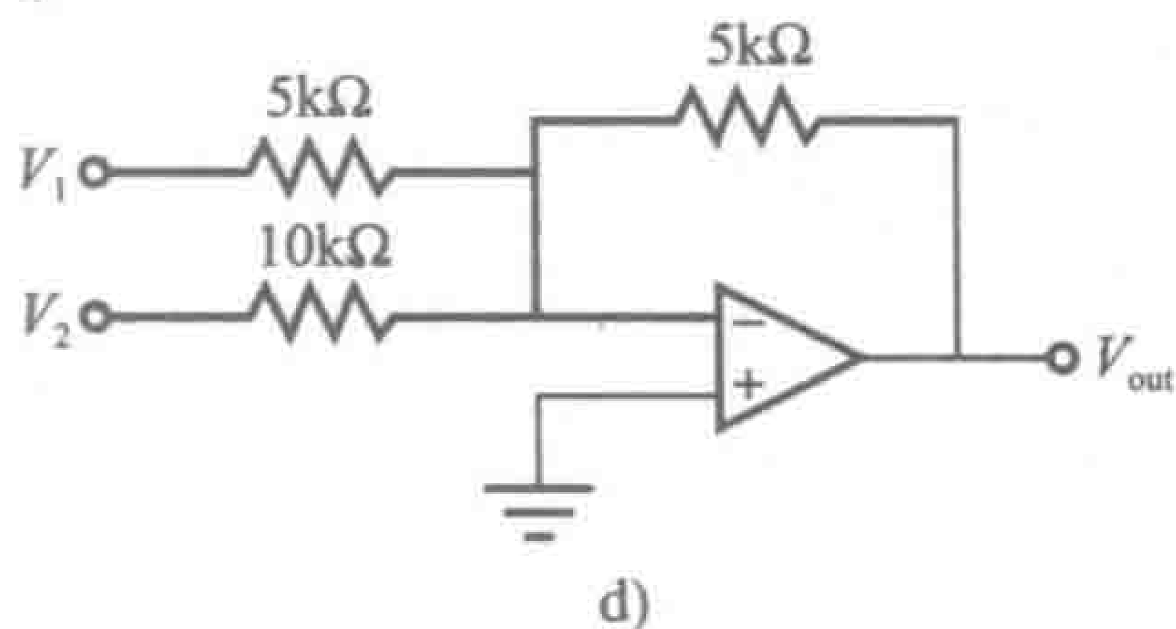
5.16　使用以下输入波形，绘制每个运算放大器电路(a～d)相应的输出波形。假设为理想运算放大器。









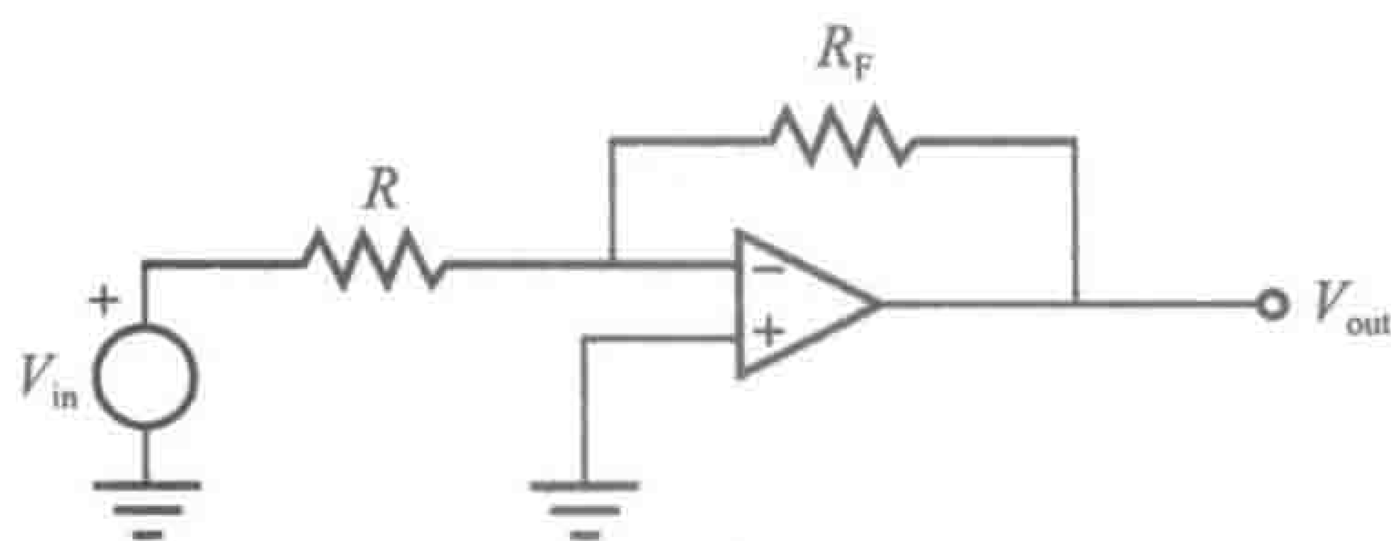


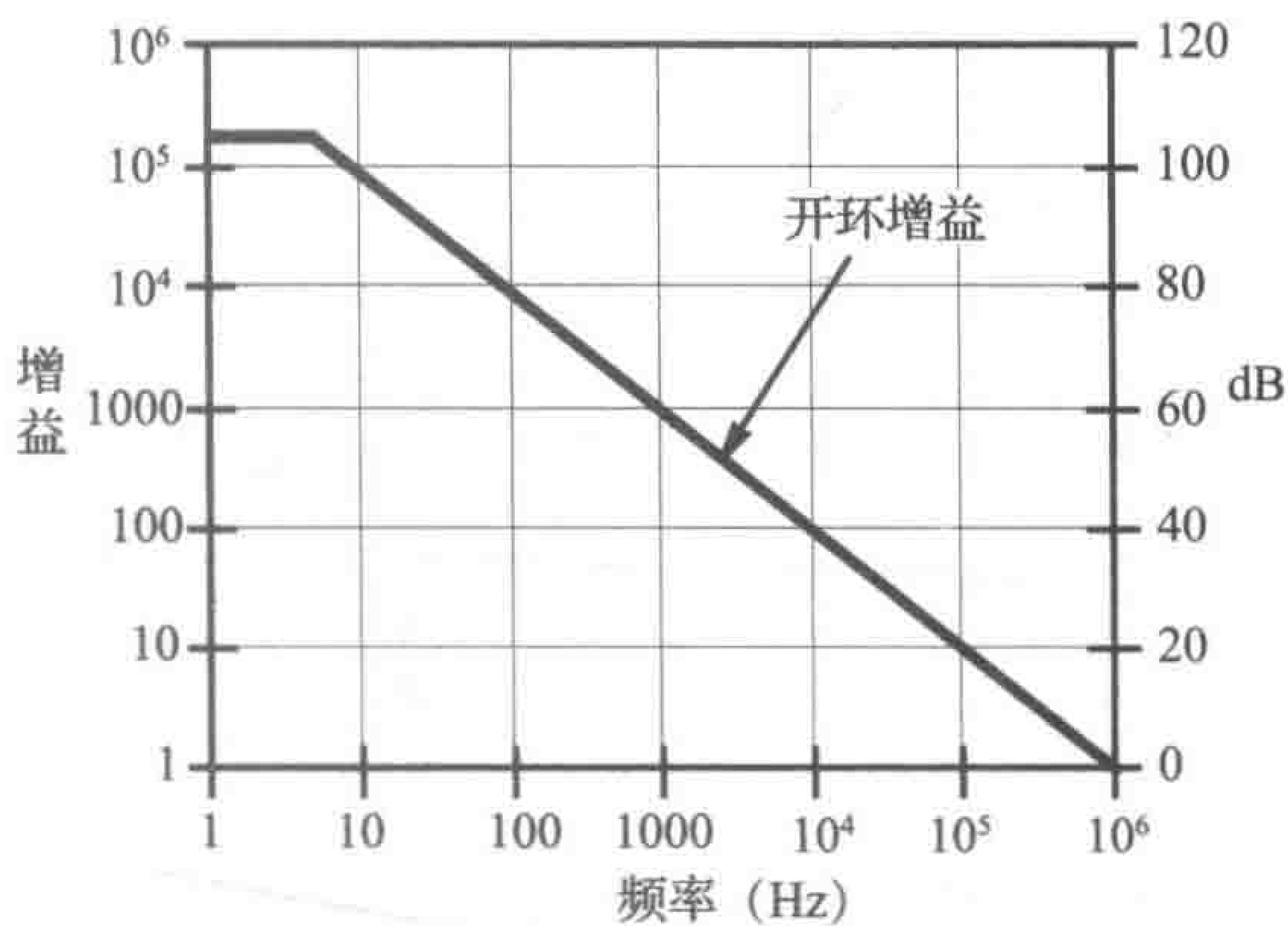
5.17　使用标准输出(不是集电极开路)比较器，绘制一个电路，当输入电压超过 5V 时可以使用它来打开 LED。

5.18　使用集电极开路输出比较器，绘制一个电路，当输入电压超过 5V 时可以使用它来打开 LED。

5.19　如果实际运算放大器的短路输出电流为 10mA，计算增益为 10，最大输出电压为 10V 的反相运算放大器电路中反馈电阻所需的最小电阻值。

5.20　给定以下电路和运算放大器的开环增益曲线，当 $R_F=20\text{k}\Omega$ 和 $R=2\text{k}\Omega$ 时，电路的跌落频率是多少？





5.21 记录课堂讨论项目 5.7 的完整答案。

参考文献

Coughlin, R. and Driscoll, F., *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits,* 4th Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics,* 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

Johnson, D., Hilburn, J., and Johnson, J., *Basic Electric Circuit Analysis,* 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

McWhorter, G. and Evans, A., *Basic Electronics,* Master Publishing, Richardson, TX, 1994.

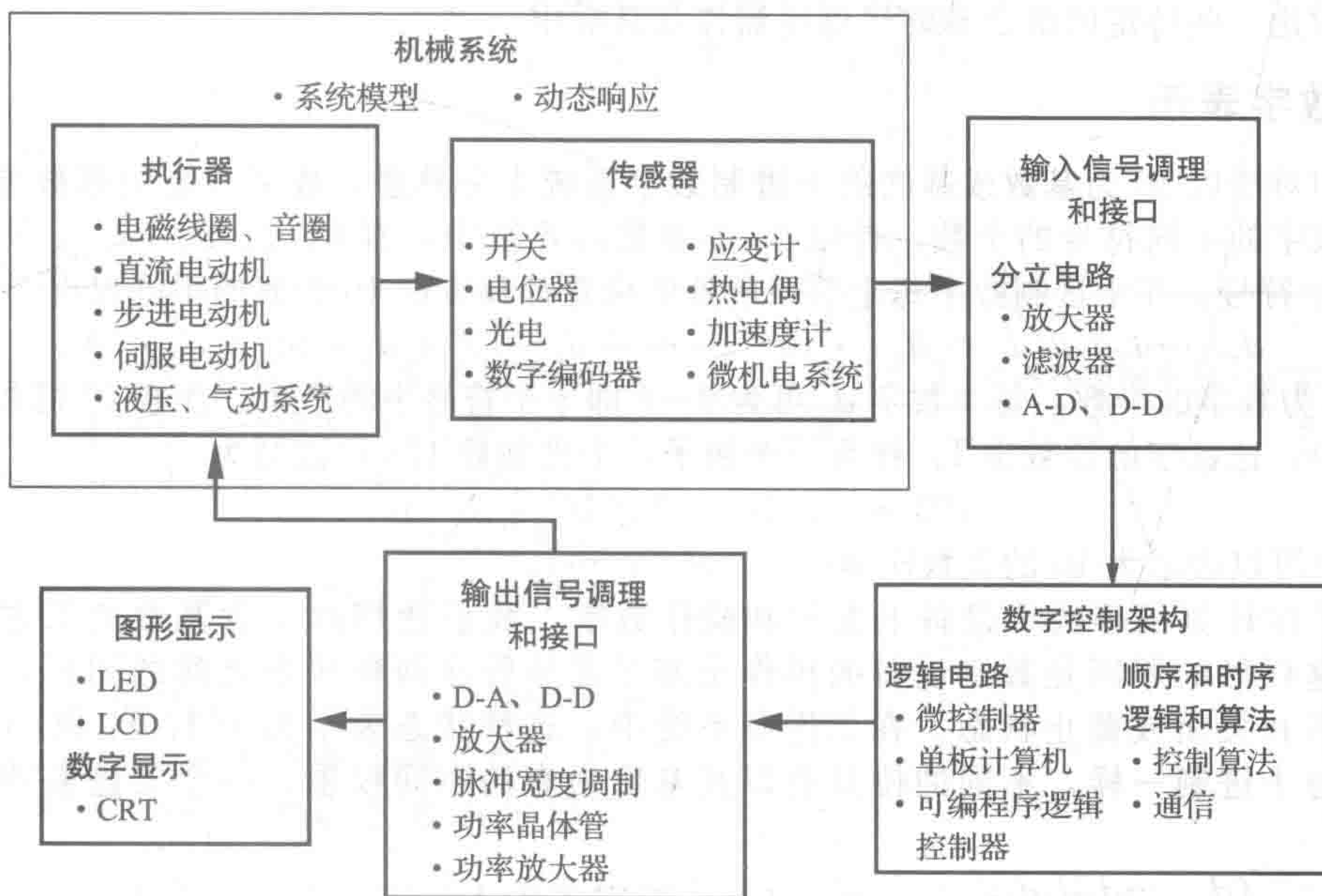
Mims, F., *Engineer's Mini-Notebook: Op Amp IC Circuits,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5011, 1985.

Mims, F., *Getting Started in Electronics,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5003A, 1991.

Texas Instruments, *Linear Circuits Data Book, Volume 1—Operational Amplifiers,* Dallas, TX, 1992.

第6章 数字电路

本章将主要介绍用于机电一体化系统的逻辑、显示、时序、定时和其他功能的数字电子器件。本章所介绍的基础内容对于了解在机电一体化系统中使用的数字器件和系统的基本功能是非常重要的。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 可以定义一个数字信号；
2. 了解如何在数字数据编码中使用二进制和十六进制；
3. 了解不同逻辑门的特点；
4. 了解组合和时序逻辑之间的差异；
5. 可以绘制数字电路的时序图；
6. 可以使用布尔数学分析逻辑电路；
7. 能够设计逻辑网络；
8. 可以使用各种各样的触发器来存储数据；
9. 理解 TTL 和 CMOS 逻辑器件之间的差异；
10. 了解如何实现 TTL 和 CMOS 器件之间的接口；
11. 使用计数器来完成不同的计数应用；
12. 了解如何使用 LED 显示屏来显示数值数据。

6.1 引言

与连续变化的模拟信号相比，数字信号只有特定的电平或状态，且以离散的步幅改变

其电平。图 6-1 所示为模拟信号和数字信号。大多数数字信号只有两种状态：高与低。具有两种状态信号的系统通常用布尔逻辑和二进制数值的形式来表示，而这构成了所有数字器件的设计基础。

数字器件根据其功能可以分为**组合逻辑**和**时序逻辑**器件。数字器件可以将数字输入转换成一个或多个数字输出。两类数字器件之间的差异主要集中在信号的定时方面。对于时序逻辑器件，输入信号的定时或历史时序对输出信号起决定作用。这与输出只取决于瞬时输入值的组合逻辑器件来说是不同的。

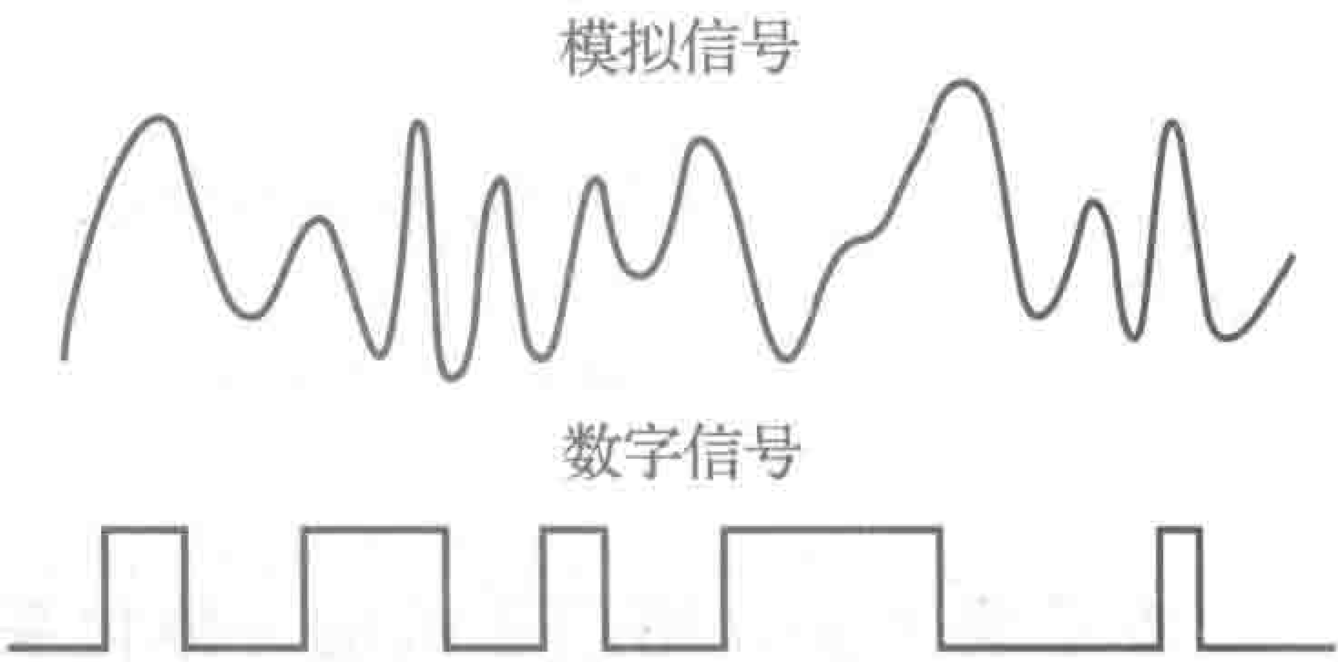


图 6-1　模拟与数字信号

在介绍了各种数字器件之前，我们将回顾二进制数系统及其在数字计算中的应用。然后讨论布尔代数，它是数字计算的数学基础。最后，将讨论一些特定的组合和时序逻辑器件及其应用。

6.2　数字表示

我们对于以 10 为基数或基底的十进制数字系统十分熟悉，数字系统的**基数**指的是用于表示数字的不同符号的个数。在以 10 为基数的系统中，有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个符号。在十进制数中每个数字所处的位置都具有以 10 为底的不同权重：

$$d_{n-1}\cdots d_3 d_2 d_1 d_0 = d_{n-1}\cdot 10^{n-1} + \cdots + d_2\cdot 10^2 + d_1\cdot 10^1 + d_0\cdot 10^0 \tag{6-1}$$

式中，n 为数字的个数，每个数字 d_i 可为 0～9 即十个符号中的一个。注意 10 的最高幂次为$(n-1)$，比数字的位数少 1。作为一个例子，十进制数 123 可以写为

$$123 = 1\times 10^2 + 2\times 10^1 + 3\times 10^0 \tag{6-2}$$

分数可以表示为 10 的负数次幂$(d_{-1},\ d_{-2},\ \cdots)$。

为了在计算机等数字设备上表示和操作数字，我们使用以 2 为基数的**二进制数字系统**。这样做的原因是数字设备的操作是基于晶体管在两种状态之间的切换：打开或饱和状态和关闭或截止状态。在二进制系统中，这种状态表示为 1(打开)和 0(关闭)。二进制与十进制一样，不同的位具有以其基数为底的不同权重。一个二进制数可以表示为

$$(d_{n-1}\cdots d_3 d_2 d_1 d_0)_2 = d_{n-1}\cdot 2^{n-1} + \cdots + d_2\cdot 2^2 + d_1\cdot 2^1 + d_0\cdot 2^0 \tag{6-3}$$

式中，每个数字是 0 和 1 两个符号之一，二进制数后方的下标 2 用于表示该数以 2 为基数，如果没有下标，则默认为十进制数。作为式(6-3)的一个例子，1101 可以表示为：

$$1101_2 = 1\cdot 2^3 + 1\cdot 2^2 + 0\cdot 2^1 + 1\cdot 2^0 = 8_{10} + 4_{10} + 1_{10} = 13_{10} \tag{6-4}$$

二进制数中的数字也称为**位**，第一个和最后一位有特殊的名字。第一个或最左边的位称为**最高有效位**(MSB)，因为它代表了 2 的最大幂。最后一位或最右边的一位称为**最低有效位**(LSB)，因为它代表了 2 的最小幂。8 位的组合称为一个**字节**。

一般来说，数字值可以用任意的基数表示，并可由下式计算

$$(d_{n-1}\cdots d_3 d_2 d_1 d_0)_b = (d_{n-1}b^{n-1} + \cdots + d_2 b^2 + d_1 b^1 + d_0 b^0) \tag{6-5}$$

式中，b 是基数，n 是数字的位数。常常需要将用一种进制表示的数字转换为另一种进制表示，式(6-5)提供了一种机制可将任何基数的数字转换为十进制数。如果需要将十进制数转变为其他进制的数，其过程是连续将该数除以基数并记下每次除法运算后的余数，将余数以相反的顺序写出即可获得以新基数表示的数。表 6-1 说明了将十进制数 123 转换为二进制数的过程。可以使用

表 6-1　十进制到二进制的转换

连续除法	余数	
123/2	1	(LSB)
61/2	1	
30/2	0	
15/2	1	
7/2	1	
3/2	1	
1/2	1	(MSB)
结果	1111011	

式(6-3)验证其结果。

二进制的算术运算与十进制类似。例6.1说明了它们之间的相似之处。视频演示6.1展示了一个二进制计数器，它使用弹珠作为位，木质切换开关存储数值。它很好地说明了二进制计数和进位的工作原理。

例6.1 二进制算术

这个例子模拟了十进制加法和乘法以及二进制加法和乘法的过程。注意，当两个1相加(1+1)时，它们的和等于0，并进一位至下一个高阶位。在下面的例子中，从第1位进1到第2位，第2位进1到第3位：

```
             11
   9       1001      9        1001
 + 3     + 0011    × 3      × 0011
  12       1100     27        1001
                            + 1001
                           + 0000
                          + 0000
                            11011
```

通常二进制数会很长且难以书写并显示，所以经常使用**十六进制**(基数为16)的数字系统作为替代来表示。表6-2列出了十六进制数字系统所用的符号及其与二进制和十进制之间的对等关系。注意字母A～F用来表示大于9的数字。

表6-2 十六进制的符号和等价数值

二进制	十六进制	十进制
0000	0	0
0001	1	1
0010	2	2
0011	3	3
0100	4	4
0101	5	5
0110	6	6
0111	7	7
1000	8	8
1001	9	9
1010	A	10
1011	B	11
1100	C	12
1101	D	13
1110	E	14
1111	F	15

将二进制数转换为十六进制，只需从最低有效位开始，从右至左将每四位数分为一组，每组用等价的十六进制数表示即可。例如，

$$123_{10} = 01111011_2 = 7B_{16} \quad (6\text{-}6)$$

另一个以简洁的形式来代替二进制数的方法是八进制(基数为8)，将二进制数转换为八进制，只需从最低有效位开始，从右至左将每三位数分为一组，每组用等价的八进制数表示即可。例如：

$$123_{10} = 001111011_2 = 173_8 \quad (6\text{-}7)$$

课堂讨论项目6.1 讨厌的数字

为什么程序员有时会弄混万圣节(10月31日)和圣诞节(12月25日)?

除了数字之外，字母也可以采用ASCII码表示成数字(二进制)形式。ASCII是美国信息交换标准码的英文缩写。ASCII码的7位代码可以用来表示所有的字母数字字符。7位代码通常存储在一个8位字节中。每一个字母数字字符对应于一个独特的代码。一些例子如下：

$$A:01000001 = 41_{16} = 65_{10}$$

$$B:01000010 = 42_{16} = 66_{10}$$

$$0:00110000 = 30_{16} = 48_{10}$$

$$1:00110001 = 31_{16} = 49_{10}$$

完整的 ASCII 码可以在网络链接 6.1 中找到。

二进制编码的十进制(BCD 码)是另一种用于输入和输出数值的数据表示方式。BCD 码用 4 个二进制位来表示一位十进制数。BCD 是一种在二进制方式下表示十进制数较为方便方法，但它在存储或传输多位数方面效率是较低的，因为它只用到了 4 位二进制数 16 个状态中的 10 个状态。十进制数转换为 BCD 码，可以直接将每一位写成 4 位二进制数。例如，

$$123_{10} = 000100100011_{bcd} \tag{6-8}$$

注意，它与二进制的表示方法不同：

$$123_{10} = 01111011_2 \tag{6-9}$$

课堂讨论项目 6.2　　**计算机魔法**

数字计算机是如何通过简单的位操作(0 和 1)来实现复杂的操作过程的？

6.3　组合逻辑与逻辑分类

组合逻辑器件是基于数学逻辑规则将二进制输入转换成二进制输出的数字器件。组合逻辑的基本操作、原理图符号和代数表达式如表 6-3 所示。这些器件也称为**门**，因为它们控制信号流从输入到输出。在输入或输出区域的小圆圈表示信号反相，即 0 变为 1 或 1 变为 0。例如，**与非门**和**或非门**分别对应于与门和或门的输出反相，因此其输出处显示了圆圈。每个器件的**真值表**如表 6-3 右侧所示。真值表用一个紧凑的方式显示了所有输入和相应输出之间的组合。通常输入量的组合写为二进制数递增列表的形式(如 00、01、10、11 这样的两位数)。网络链接 6.2 提供了一个有趣的在线数字电路模拟器，可以通过拖放和连接逻辑门，以交互的方式查看组合逻辑电路的功能。

表 6-3　组合逻辑运算

门	操作	符号	表达式	真值表
反相器	信号反相	A → C	$C=\overline{A}$	A C 0 1 1 0
与门	与逻辑	A, B → C	$C=A\cdot B$	A B C 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1
与非门	与逻辑反向	A, B → C	$C=\overline{A\cdot B}$	A B C 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0
或门	或逻辑	A, B → C	$C=A+B$	A B C 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1
或非门	或逻辑反向	A, B → C	$C=\overline{A+B}$	A B C 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0

（续）

门	操作	符号	表达式	真值表
异或门	异或逻辑	A、B → C	$C = A \oplus B$ $= A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$	A B C 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0
缓冲器	增加输出信号的电流	A → C	$C = A$	A C 0 0 1 1

标准的与、与非、或、或非及异或门都具有两个输入，但其他形式有可能超过两个输入。对于有多个输入的**与**门来说，当且仅当所有输入为1时输出才为1；否则，输出是0。对有多个输入的**或**门来说，当且仅当所有输入为0时输出为0；否则，输出为1。在**异或**门的情况下，如果所有的输入都是0或者所有的输入都是1，则输出是0，否则输出是1。算术符号可以用来表示逻辑功能："+"表示"或"运算，"·"表示"与"运算，上划线($\overline{X}$)表示逻辑**非**，即反相运算。

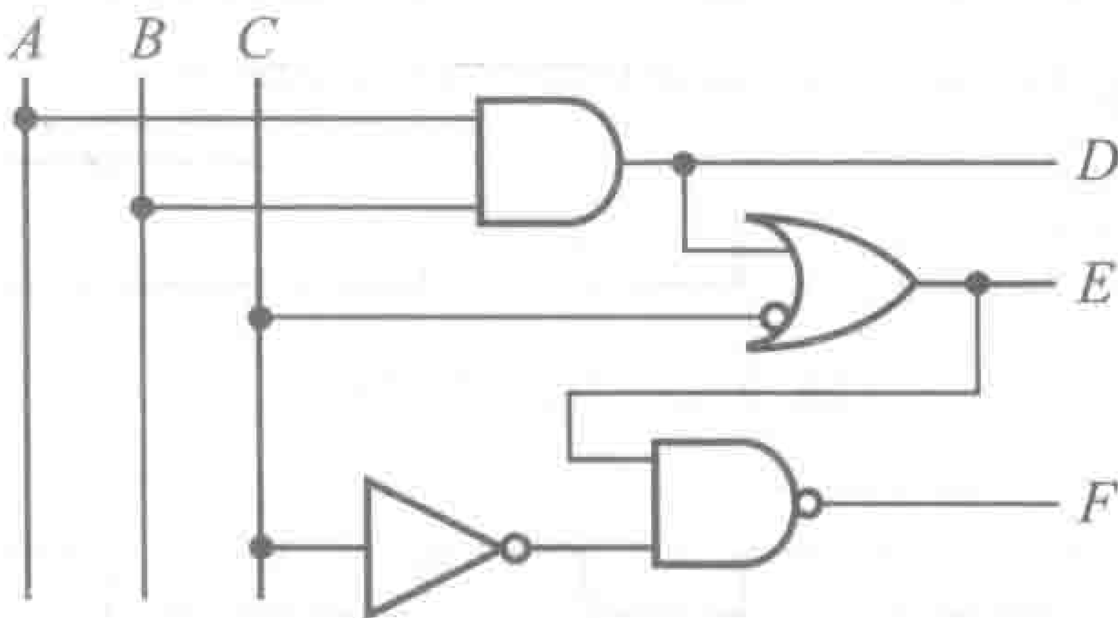
缓冲器主要用于维持原有输入状态同时提高输出电流。这一点对于通过单个输出驱动多个输入来说是很重要的。普通的数字门**扇出**数是有限的，扇出数指一个门输出可以驱动具有同类数字输入门电路的最大数量(参见6.11.3节)。缓冲器可以提供更大的输出电流来克服原有门电路扇出能力的限制。

表6-3中的所有逻辑门电路都由**集成电路**(IC)制作而成，这个电路由在一个硅片上的晶体管、电阻和二极管构成。视频5.1展示了各种类型的IC封装，视频5.2～5.4演示了集成电路的制造过程。

数字集成电路有两种类型，一是由晶体管逻辑构成TTL，另一是由互补金属氧化物半导体构成的CMOS。输入与输出的电压水平定义了**逻辑低**(0)和**逻辑高**(1)。逻辑电平的范围取决于器件的类型。当混合不同类型的数字集成电路时需要谨慎，因为不同的数字器件具有不同的电流源和负载能力。TTL和CMOS系列器件在6.11节中将进行详细描述。

例6.2 组合逻辑

这个例子说明了如何确定逻辑图中信号的表达式及其取值。下面是示例的逻辑电路：



信号A、B和C是输入，信号D、E、F属于输出。每一个信号可为高(1)或低(0)。当分析逻辑电路时，先写出电路中所有信号的逻辑表达式。输出D是最简单直接的，因为它是信号A和B与组合：

$$D = A \cdot B$$

信号E以信号D和信号C的反相作为或门的输入：

$$E = D + \overline{C}$$

上式也可以写为

$$E = (A \cdot B) + \overline{C}$$

最后，信号 F 是信号 E 和信号 C 反相输入的与非组合：

$$F=\overline{E\cdot\overline{C}}$$

这里需要注意的是反向操作是针对 $E\cdot\overline{C}$ 这个整体表达式的，因为与非门是对 E 和 $\overline{C}$ 的与组合的输出取反的。

另一种表达逻辑电路功能的方式是在一个真值表上总结所有可能的输入和输出组合。每个输出值可以通过逻辑表达式来确定。例如，对于输入组合 $A=0$，$B=0$ 且 $C=0$ 来说，$D=0\cdot 0=0$，$E=0+\overline{0}=0+1=1$，$F=\overline{1\cdot\overline{0}}=\overline{1\cdot 1}=\overline{1}=0$。

A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1
1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	1
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1

当你对逻辑表达式和真值表较为熟悉时，能够通过一些捷径来快速构建真值表。例如，因为 D 是 A 和 B 的与组合，只有当 A 是 1，B 是 1 时，D 才是 1；否则，$D=0$。因此，可以迅速地填写 D 所对应的值为 0，除了 A 和 B 都是 1 的时候。同样，E 是一个或逻辑，只有当 D 为 1 或者 $\overline{C}$ 为 1(即 $C=0$)时，才会输出 1。另一种解释是，只有 $\overline{C}$ 和 D 都为 0 时，E 才为 0。当 E 为 1 且 $\overline{C}$ 为 1(即 $C=0$)时，$F=0$。

6.4 时序图

绘制时序图有助于分析复杂的逻辑电路，时序图显示了随着时间的变化逻辑输入与输出在同一时刻的电平状态。时序图可以用来说明输入值所有可能的组合及相应的输出值，这提供了一种图形化的输入/输出关系。与门和或门的时序图如图 6-2 和图 6-3 所示。多输入数字示波器和逻辑分析仪具有显示数字电路时序图的功能。

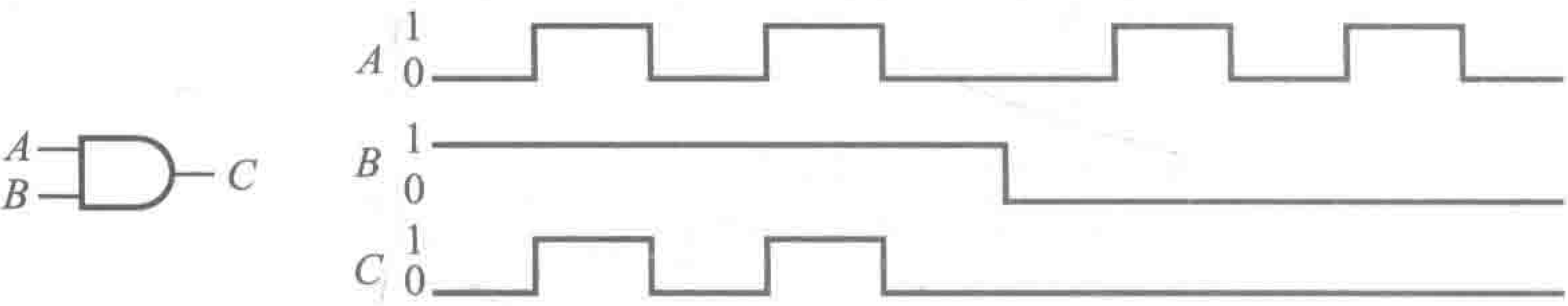


图 6-2　与门时序图

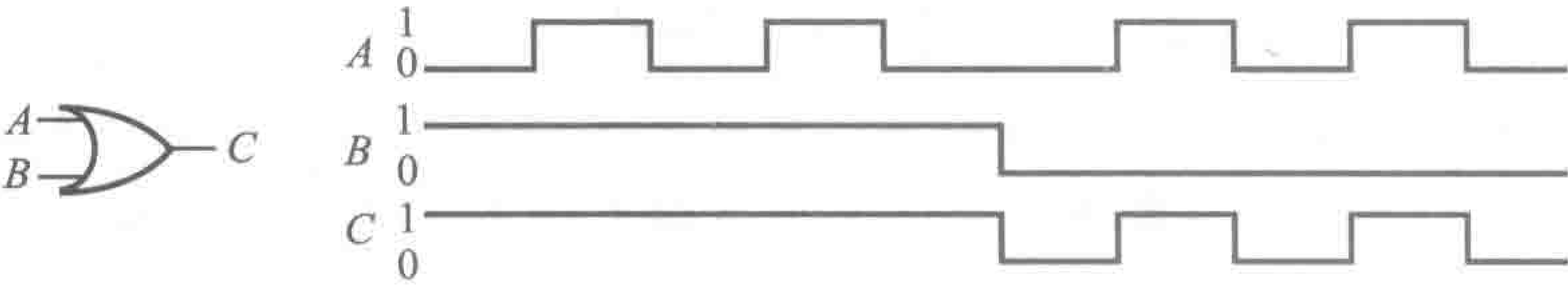


图 6-3　或门时序图

6.5 布尔代数

在确定逻辑电路的数学表达式时，了解布尔代数的相关知识非常重要，因为它定义了表达和简化二进制逻辑语句的规则。基本的布尔逻辑法则和恒等式如下所示。符号上方的

一横代表布尔运算中的非运算，即对信号取反。

布尔代数法则和恒等式

基本法则

与	或	非	
$A+0=A$	$A\cdot 0=0$		
$A+1=1$	$A\cdot 1=A$	$\overline{\overline{A}}=A$	(6-10)
$A+A=A$	$A\cdot A=A$	（双重取反）	
$A+\overline{A}=1$	$A\cdot \overline{A}=0$		

交换律

$$A+B=B+A \tag{6-11}$$
$$A\cdot B=B\cdot A \tag{6-12}$$

结合律

$$(A+B)+C=A+(B+C) \tag{6-13}$$
$$(A\cdot B)\cdot C=A\cdot(B\cdot C) \tag{6-14}$$

分配律

$$A\cdot(B+C)=A\cdot B+A\cdot C \tag{6-15}$$
$$A+(B\cdot C)=(A+B)\cdot(A+C) \tag{6-16}$$

其他有用的恒等式

$$A+(A\cdot B)=A \tag{6-17}$$
$$A\cdot(A+B)=A \tag{6-18}$$
$$A+(\overline{A}\cdot B)=A+B \tag{6-19}$$
$$(A+B)\cdot(A+\overline{B})=A \tag{6-20}$$
$$(A+B)\cdot(A+C)=A+(B\cdot C) \tag{6-21}$$
$$A+B+(A\cdot\overline{B})=A+B \tag{6-22}$$
$$(A\cdot B)+(B\cdot C)+(\overline{B}\cdot C)=(A\cdot B)+C \tag{6-23}$$
$$(A\cdot B)+(A\cdot C)+(\overline{B}\cdot C)=(A\cdot B)+(\overline{B}\cdot C) \tag{6-24}$$

德·摩根定律在布尔表达式的重新排列或简化长布尔表达式、与门和或门的相互转换方面非常有用：

$$\overline{A+B+C+\cdots}=\overline{A}\cdot\overline{B}\cdot\overline{C}\cdots \tag{6-25}$$
$$\overline{A\cdot B\cdot C\cdots}=\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+\cdots \tag{6-26}$$

如果对式(6-10)两边同时取反并应用双重取反法则，则德·摩根定律变为下面的形式：

$$A+B+C+\cdots=\overline{\overline{A}\cdot\overline{B}\cdot\overline{C}\cdots} \tag{6-27}$$
$$A\cdot B\cdot C\cdots=\overline{\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+\cdots} \tag{6-28}$$

真值表对于验证恒等式非常有用。例如，为了验证式(6-19)的有效性，我们可以构建以下真值表，其中恒等式中的每一项都根据所有输入组合进行评估：

A	$\overline{A}$	B	$\overline{A}\cdot B$	$A+\overline{A}\cdot B$	$A+B$
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1

如果等式的两侧对每一个输入组合都是相等的，则证明恒等式是成立的。

例 6.3　简化布尔表达式

使用布尔运算法则和恒等式来简化以下表达式：

$$X=(A\cdot B\cdot C)+(B\cdot C)+(\overline{A}\cdot B)$$

首先，我们可以使用结合律及基本法则 $Z\cdot 1=Z$ 来改写这个方程：

$$X=A\cdot(B\cdot C)+1\cdot(B\cdot C)+(\overline{A}\cdot B)$$

使用分配律对$(B\cdot C)$项进行处理，即可得到：

$$X=(A+1)\cdot(B\cdot C)+(\overline{A}\cdot B)$$

因为 $A+1=1$、$1\cdot(B\cdot C)=B\cdot C$，所以：

$$X=(B\cdot C)+(\overline{A}\cdot B)$$

进一步，通过结合律和分配律可以得到：

$$X=B\cdot(C+\overline{A})$$

我们将原来表达式中的 7 个运算(包括取反)减少为最后表达式中的 3 个。这非常重要，因为这减少了搭建电路所需的逻辑门数量。

6.6 逻辑网络设计

作为将组合逻辑应用到实际工程问题的例子，假设要求设计一个简单的家用安全保护系统电路。房主希望当有人破坏门或窗进入房间，或者家中无人有东西在房间里走动时，系统能够发出警报声。在某些情况下，用户可能还想禁用报警系统的一部分。假设用传感器来检测窗户或门被破坏和物体的运动。为了实现这个安全系统，可以设计一个用户设定的由两个开关构成的组合逻辑电路。

以下步骤可以用来设计解决这类问题的数字电路：

1. 通过文字描述定义问题。
2. 写出伪逻辑语句，并翻译成布尔表达式。
3. 写出布尔表达式。
4. 尽可能简化和优化布尔表达式。
5. 写出表达式的所有与、与非、或、或非电路的实现，选择一种逻辑表达使得实现电路所需的逻辑门集成电路数量最少。
6. 画出电路实现的逻辑原理图。

每一个步骤都将在下面的安全锁示例中进行详细介绍。

6.6.1 用文字定义问题

首先用文字描述所要解决的问题，在此基础上开始逻辑设计。对此例，希望报警系统产生一个高电平信号，对传感器的某种组合状态输出报警声。同时，希望能够选择下面 3 种工作状态中的一种：

1. 当窗户或门被破坏时能够发出报警声音。这个状态对于人睡着时是有用的。
2. 当门窗被破坏或者房间内有物体在移动时能发生报警声。这种状态对于房主不在时是有用的。
3. 禁用状态，不出现报警声音。这种状态对于正常家庭活动是有用的。

由此，可以定义与电路输入输出相关的布尔变量，下面的布尔变量用于设计安全系统的逻辑：

- A：门窗传感器的状态
- B：运动检测器的状态
- Y：报警声音的输出
- CD：两位编码用于选择定义的工作状态

$$CD = \begin{cases} 01 & \text{工作状态 1} \\ 10 & \text{工作状态 2} \\ 00 & \text{工作状态 3} \end{cases}$$

系统的输入为 A、B、C 和 D，输出为 Y。假设 A、B 和 Y 采用**正逻辑**，1 代表有效或打开状态，0 代表无效或关闭状态。

6.6.2 写出伪逻辑语句

进一步将上述的文字描述过程翻译成类似逻辑运算的伪逻辑语句。该安全系统的伪逻辑语句为：

如果“*A* 为高 *and* *C D* 为 01”*or*“*A* 或 *B* 为高 *and* *CD* 为 10”

则“激活报警(Y=1)”

注意：斜体字为伪逻辑语句，它有助于书写布尔表达式。

6.6.3 写出布尔表达式

根据伪逻辑语句即可写出布尔表达式。为了从有效的控制代码 01 中产生输出 1，需要构建表达式 $\overline{C}\cdot D$，而为了从有效的控制代码 10 中输出 1，需要构建表达式 $C\cdot\overline{D}$。基于此，此安全系统完整的布尔表达式可以表示为：

$$Y = A\cdot(\overline{C}\cdot D) + (A+B)\cdot(C\cdot\overline{D}) \tag{6-29}$$

当 $A\cdot(\overline{C}\cdot D)$ 为 1 或者 $(A+B)\cdot(C\cdot\overline{D})$ 为 1 时，警报会响($Y=1$)，否则警报不会发出声音($Y=0$)。在第一项中当且仅当 A 为 1、C 为 0 且 D 为 1 时才会输出 1，在第二项中当且仅当 A 或 B 为 1、C 为 1 且 D 为 0 时输出 1。

对于此例，可以通过观察 C 和 D 的真值表来简化式(6-29)。

C	D	$(\overline{C}\cdot D)$	$(C\cdot\overline{D})$
0	0	0	0
1	0	0	1
0	1	1	0

注意，对给定的控制组合，有 $(\overline{C}\cdot D)=D$ 及 $(C\cdot\overline{D})=C$。如果不允许出现 $CD=11$ 的状态(参见习题 6.21)为 1，则式(6-29)可以化简为：

$$Y = (A\cdot D) + (A+B)\cdot C \tag{6-30}$$

6.6.4 逻辑与实现

当简化布尔表达式后，往往希望将其所有的逻辑操作通过单一的首选门电路(如与、或)实现，其原因在于逻辑门通常以 4、6 或 8 的组合封装在一个集成电路(IC)中。因此，如果能够使用一种类型的逻辑门就可以减少所需的集成电路的总数。通过重复使用德·摩根定律可以将一种形式的逻辑实现转换为另一种形式。对于该安全系统的例子，通过使用式(6-27)将或运算转变为与运算，可获得其逻辑的全与实现。考虑式(6-30)：

$$Y = (A\cdot D) + (A+B)\cdot C \tag{6-31}$$

首先，变换 $A+B$：

$$Y = (A\cdot D) + (\overline{\overline{A}\cdot\overline{B}})\cdot C \tag{6-32}$$

此时，获得了两个表达式之间的或实现，继续将或转换为与，最终可得：

$$Y = \overline{\overline{A\cdot D}\cdot\overline{(\overline{\overline{A}\cdot\overline{B}})\cdot C}} \tag{6-33}$$

6.6.5 绘制电路图

根据式(6-33)给出的最终布尔表达式，可以仅使用与门和反相器绘制出电路图，如

图 6-4所示。将布尔表达式中的各子项输出作为中间变量在图中标识出来，这将有助于防止或发现电路图中的逻辑错误。

因为总共有 4 个与门和 6 个反相器，电路只需两片 IC：1 个包含 4 个与门的集成电路(如 7408)和 1 个包含 6 个反相器集成电路(如 7404)。式(6-30)也可以用两片集成电路来实现，因为式中的逻辑仅需两个或门和两个与门。因此，对于该安全系统，全与门实现并未减少所用的 IC 数量。然而，对于复杂的布尔运算，单一类型的逻辑门实现通常可以减少所需 IC 的数量。

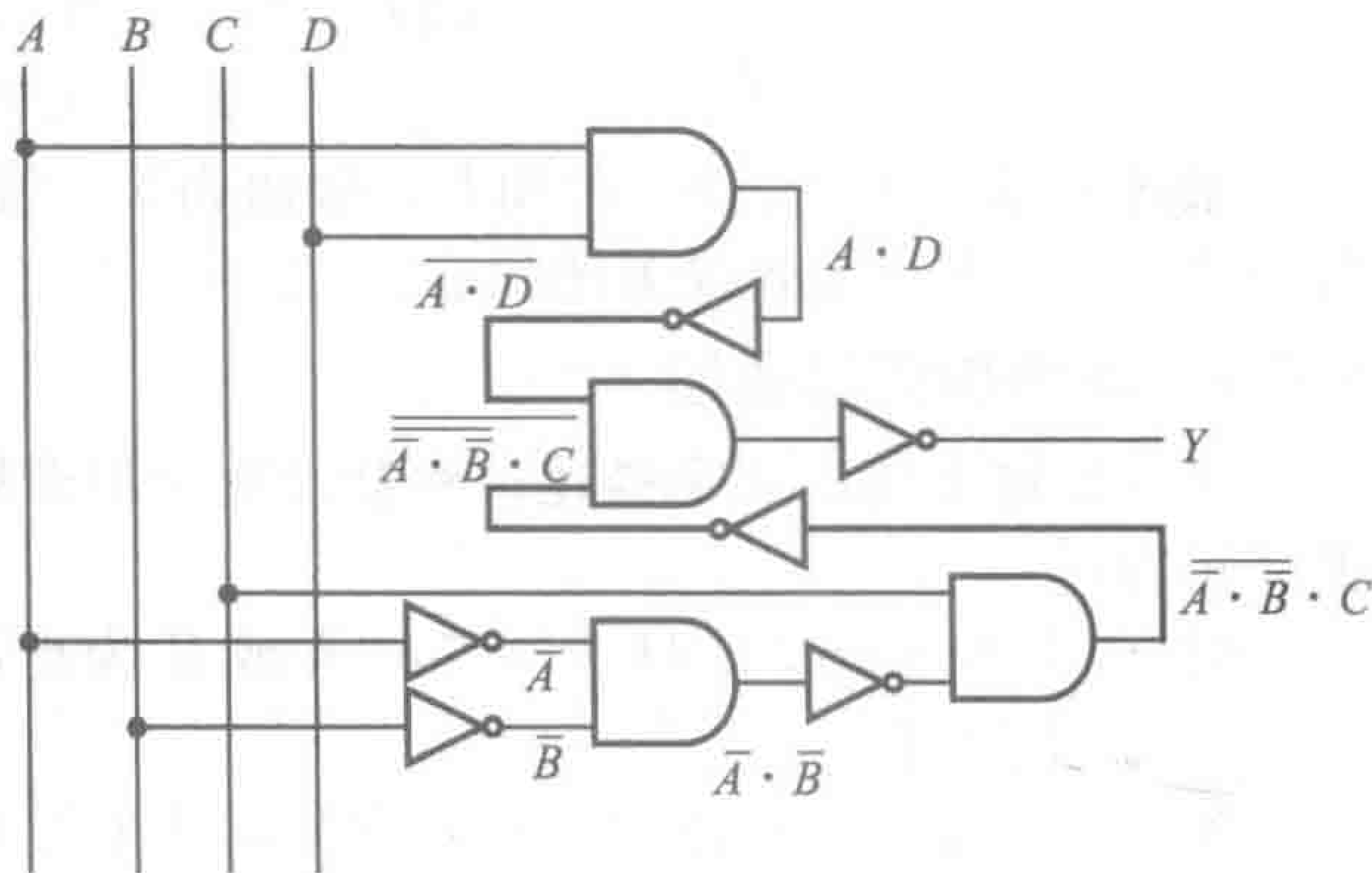


图 6-4 安全系统的与门逻辑图

上述所提出的解决方案称为硬件解决方案，因为它使用集成逻辑门电路来提供所需的逻辑运算。另一种方法是使用单片机程序来实现，称为软件解决方案，在 7.5.2 节中例 7.5 对其进行了详细描述。

课堂讨论项目 6.3　　日常逻辑

列出使用逻辑完成控制目的的日常使用的设备。阐述每个设备所涉及的控制逻辑。

6.7 确定真值表对应的布尔表达式

6.6.1 节及 6.6.2 节通过文字描述定义了相应的逻辑问题并写出了其伪逻辑语句，但有时采用真值表给出完整的输入输出组合更为方便。此时，有两种方法可以直接获取真值表所对应的布尔表达式。本节介绍这两种方法并通过例子说明其应用。

第一种方法称为**积和(与或)法**。其出发点是组合逻辑输出可以表示为输入乘积(与)之和(或)。例如，3 个输入 A、B、C 和一个输出 X，其积和表达式是关于输入项的布尔表达式，其输入进行与运算后形成乘积项，然后乘积项进行或运算(求和)确定输出 X。下面的方程给出积和表达式的一个示例：

$$X=(\overline{A}\cdot B\cdot C)+(\overline{A}\cdot\overline{B}\cdot C)+(A\cdot B\cdot\overline{C}) \tag{6-34}$$

如果对真值表中输出为 1 的各行构建乘积项，然后所有乘积项相加即可获得真值表对应的全部逻辑。对于输出为 1 的行，为了确保其输出为 1，行中任何一个等于 0 的输入必须取反再加入乘积项。确定所有输出为 1 的乘积项组合即可确定真值表所表示的全部逻辑状态，因为其他所有乘积项组合均为 0。

第二种方法称为**和积(或与)法**。其出发点是组合逻辑的输出可以表示为输入和(或)的乘积(与)。例如，3 个输入 A、B、C 和 1 个输出 X，其和积表达式是关于输入项的布尔表达式，其输入进行或运算后形成求和项，然后求和项进行与运算(相乘)后确定输出 X。下面的方程为和积表达式的一个示例：

$$X=(\overline{A}+B+C)\cdot(\overline{A}+\overline{B}+C)\cdot(A+B+\overline{C}) \tag{6-35}$$

如果对真值表中输出为 0 的各行构建求和项，然后所有求和项相乘即可获得真值表对应的全部逻辑。对于输出为 0 的行，为了确保其输出为 0，行中任何一个等于 1 的输入必须取反再加入求和项。确定所有输出为 0 的求和项组合即可确定真值表所表示的全部逻辑状态，因为其他所有求和项组合均为 1。

例 6.4　　积和与和积

二进制算术中最简单的运算是对两个最低有效位求和，其结果由一个求和结果位和一

个进位构成。两位相加的4种可能组合如下所示：

$$\begin{array}{ccccc} & & & 1 & C \\ 0 & 0 & 1 & 1 & A \\ \underline{+0} & \underline{+1} & \underline{+0} & \underline{+1} & \underline{+B} \\ 0 & 1 & 1 & 0 & S \end{array}$$

最后一列显示了所使用的相关术语。两个输入位标记为 A 和 B，两位之和标记为 S，如果有进位，将其标识为 C。上面求和组合中仅最后一种情况(1+1)进位为1，其他均为0。

该运算的真值表为：

A	B	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

我们使用积和与和积两种方法来确定其输出逻辑以说明两种方法之间的不同。

根据式(6-34)后的说明方法，积和形式的输出 S 可以表示为：

$$S=(\overline{A}\cdot B)+(A\cdot\overline{B})$$

其中乘积(与)项分别对应第2行和第3行，它们的输出状态为1。

根据式(6-35)后的说明方法，和积形式的输出 S 可以表示为：

$$S=(A+B)\cdot(\overline{A}+\overline{B})$$

其中和(或)项分别对应第1行和第4行，它们的输出状态为0。

输出 C 的积和表达式为：

$$C=(A\cdot B)$$

其中乘积(与)项对应第4行，其输出为1。

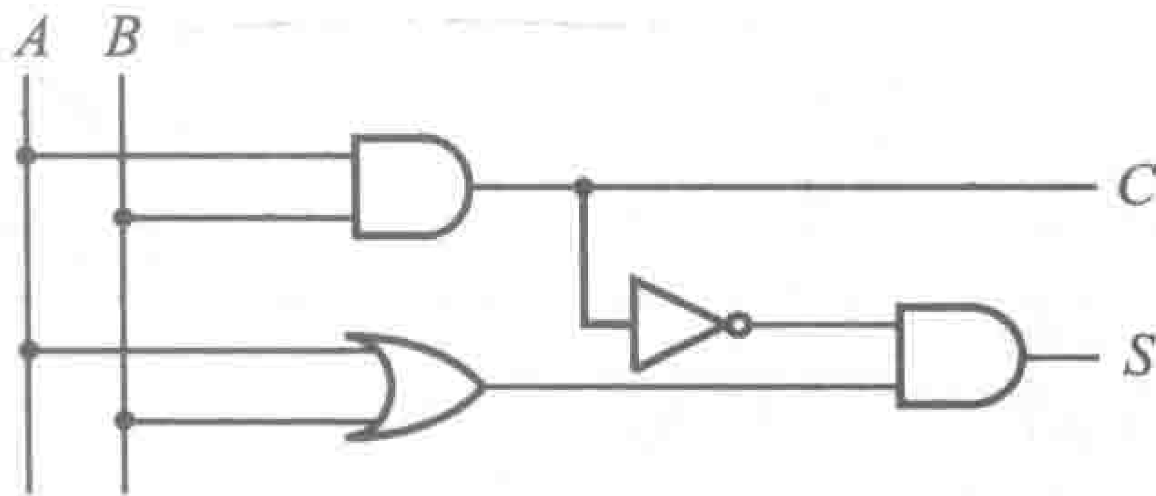
输出 C 的和积表达式为：

$$C=(A+B)\cdot(A+\overline{B})\cdot(\overline{A}+B)$$

其中和(或)项对应1、2、3行，其输出为0。

注意，积和方法更适用于输出 C，因为只有一行的输出为1。上述表达式可以通过对比真值表与期望真值表的结果来验证正确性(见问题6.29)。

如果使用 S 的和积结果和 C 的积和结果，则获得的电路将使用最少数量的门：



这种电路称为**半加法器**，因为它仅适用于两个多位数的最低有效位的相加运算。更高阶位的求和需要考虑低阶位的进位，并其作为一个附加输入，此时的电路称之为**全加法器**(见问题6.31)。

课堂讨论项目6.4　积和与和积表达的等价性

只使用和积运算画出例6.4中 S 与 C 的逻辑电路，然后只使用积和运算再次绘制其逻辑电路。比较所画的电路图与实例中给出的电路图。说明积和与和积表达结果是等价的。

除了和积与积和之外的另一种方法称为卡诺图映射。这种方法通过真值表操作能够给出一个化简后的布尔表达式。网络链接 6.3 描述了该方法并提供了实例。

6.8 时序逻辑

组合逻辑器件的输出仅与输入值有关，与输入时序无关。而对**时序逻辑**器件，其输入信号的时间或时序非常重要。这类器件包括触发器、计数器、单稳电路、锁存器以及更复杂的器件，如微处理器。时序逻辑器件通常在独立的触发信号从一个电平转换到另一个电平时，其输出才会对输入做出响应。触发信号通常称为**时钟**(CK)信号。时钟信号可以是周期方波或非周期的脉冲序列。图 6-5 给出了与时钟脉冲相关的边沿术语，图中箭头用于表示状态变化时信号的边沿。**正边沿(上升沿)触发**器件对从低到高(0 到 1)的边沿变化做出响应，而**负边沿(下降沿)触发**器件对由高到低(1 到 0)的边沿变化做出响应。这个话题将在 6.9.1 节介绍触发器时进一步讨论。

6.9 触发器

因为数字数据是以位形式进行存储的，所以数字存储器件[如计算机随机存取存储器(RAM)]需要在两个二进制状态之间进行切换以实现数据存储。**触发器**是一种时序逻辑器件，可用于实现该功能。触发器称为**双稳**器件，因为它有且仅有两个稳定的输出状态：1(高)和 0(低)。只要输入信号不改变状态，它就可以将输出维持在一个特定的状态(即存储)。在数字计算机中，这是所有半导体信息存储和处理的基础。事实上，触发器能够实现许多基本的功能，这些功能对几乎所有的数字装置都是非常关键的。

最基本的触发器为 **RS 触发器**，其示意图如图 6-6 所示。S 是**置位**输入，R 是**复位**输入，Q 和 $\overline{Q}$ 是**互补输出**。大多数触发器包含两个输出，其中一个输出是另一个取反。RS 触发器基于以下规则运行：

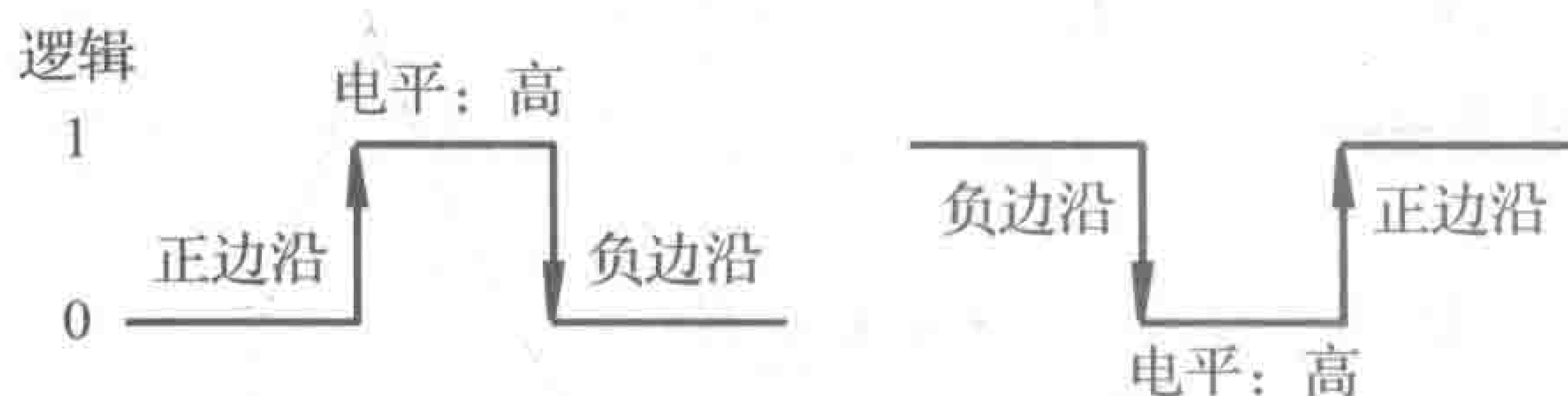


图 6-5　时钟脉冲的边沿

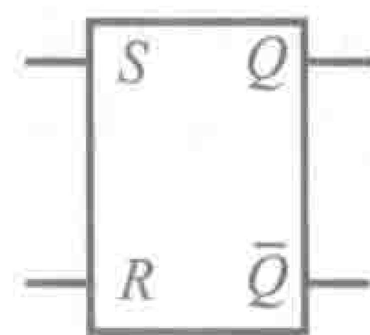


图 6-6　RS 触发器

1. 当输入 S 和 R 全为 0 时，触发器的输出保持不变。
2. 当 S 为 1 且 R 为 0 时，触发器将置位为 $Q=1$，$\overline{Q}=0$。
3. 当 S 为 0 且 R 为 1 时，触发器复位为 $Q=0$，$\overline{Q}=1$。
4. S 和 R 不允许同时为 1，因为此时输出是不可预知的。

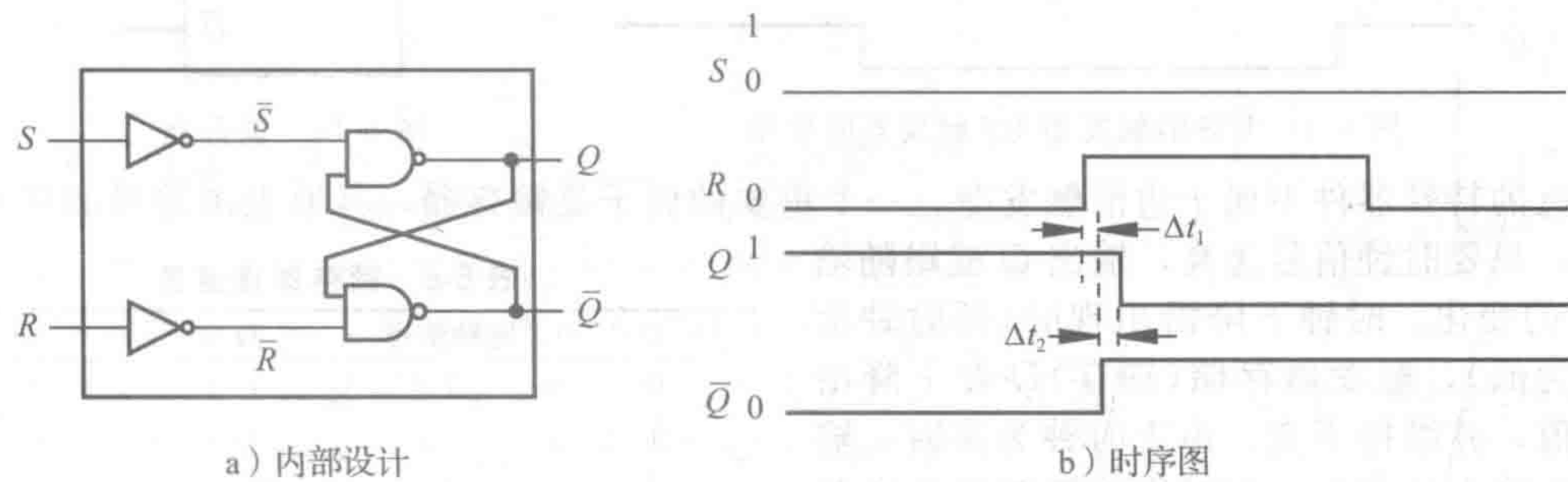
真值表是一种用于描述触发器功能的有效工具。基本 RS 触发器的真值表如表 6-4 所示。第一行显示了触发器的存储状态，即触发器维持上一次置位或复位操作的结果。Q_0 为输入条件建立前的输出，1 表示逻辑高，0 表示逻辑低。最后一行的 NA 表示该行所给出的输入条件是不允许的。因为需要避免使用 $S=1$ 且 $R=1$ 的输入状态，RS 触发器在实际设计中很少使用。其他可以避免 NA 限制的更为通用的触发器将在后续部分进行介绍。

表 6-4　RS 触发器的真值表

输入		输出	
S	R	Q	$\overline{Q}$
0	0	Q_0	$\overline{Q}_0$
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	NA	

为了了解触发器和其他时序逻辑电路的功能，对图 6-7a 所示的 RS 触发器的内部设计进行分析。其内部为带有反馈(从与非门输出端到其输入端)连接的组合逻辑门。图 6-7b 说明了各信号的时序关系，与非门很短的传播延迟将对其产生影响。当信号 R 从 0 变为 1

时，下方的与非门输入为 0 而 Q 仍然是 1，经过短暂的传播延迟 Δt_1 后，$\overline{Q}$ 变为 1。$\overline{Q}$ 反馈到上方与非门的输入端，经过短暂的延时 Δt_2 后使得 Q 变为 0，触发器复位，设置函数的操作与此相同。即使 R 返回 0，输出也仍然维持上述状态。传播延迟 Δt_1 和 Δt_2 通常在纳秒范围内。所有时序逻辑器件的功能都取决于反馈和传播延迟。

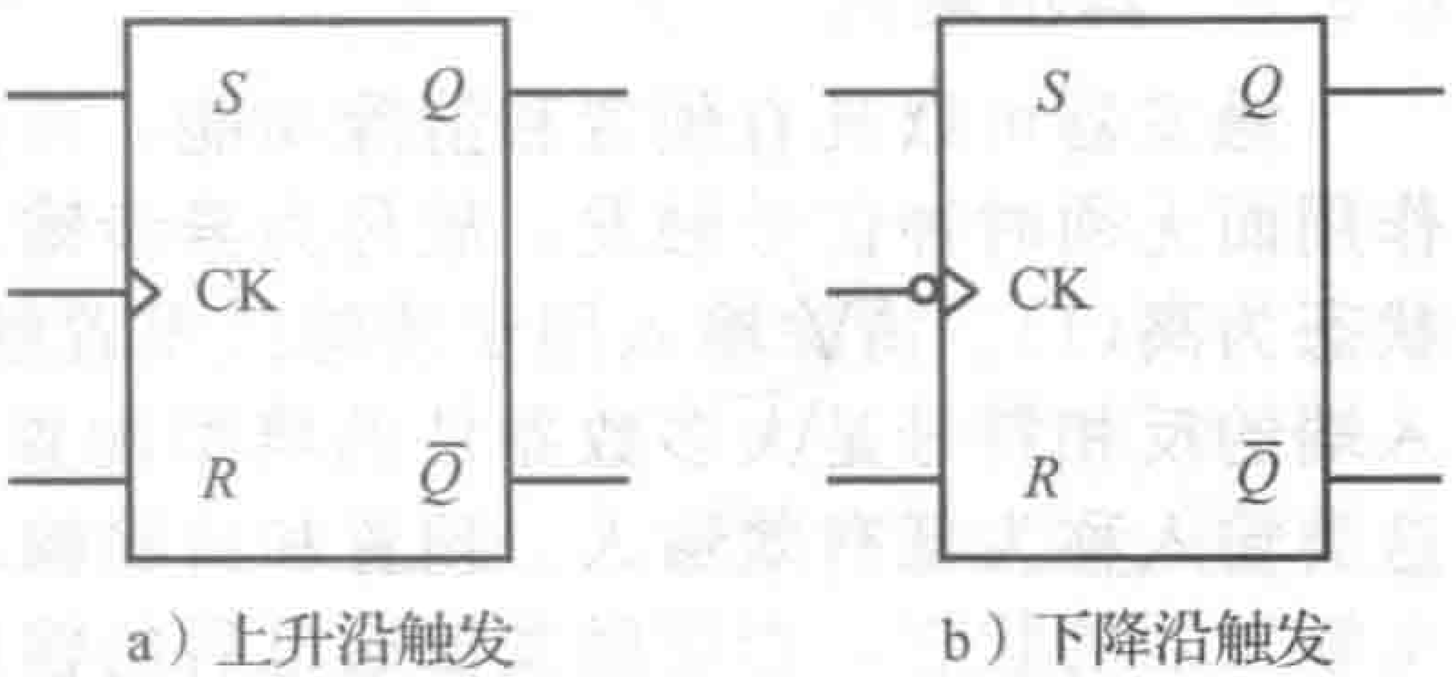


a）内部设计　　b）时序图

图 6-7　RS 触发器的内部设计及其时序图

6.9.1　触发器的触发

触发器通常由**时钟控制**，即由命名为"时钟"的信号确定器件输出状态变化的坐标或同步时刻。这使得如微处理器等采用公共时钟触发复杂电路的设计成为可能。触发称为**同步**的原因在于输出状态根据时钟脉冲协调变化，不同类型时钟触发器的输出可以根据时钟脉冲的上升沿或下降沿来发生改变。这些触发器称为**边沿触发型**触发器。上升沿触发在原理图上通过触发器时钟输入端上的一个小尖括号来表示(见图 6-8a)。下降沿则用时钟输入端上的小圆圈和尖括号来表示(见图 6-8b)。



a）上升沿触发　　b）下降沿触发

图 6-8　边沿触发型 RS 触发器

边沿触发型 RS 触发器的功能根据以下规则给出：

1. 如果有效时钟边沿出现时 S 和 R 都为 0，则输出状态保持不变。
2. 如果有效时钟边沿出现时 S 为 1、R 为 0、触发器输出置位为 1，如果输出已经为 1，则输出不变。
3. 如果有效时钟边沿出现时，S 为 0、R 为 1、触发器输出复位为 0，如果输出已经为 0，则输出不变。
4. 当有效时钟边沿出现时，S 和 R 不能同时为 1。

上升沿触发型 RS 触发器(见图 6-8a)的真值表如表 6-5 所示。时钟(CK)所在列中向上的箭头↑表示从 0 到 1 的上升沿。倒数第二行的 NA 表示这一行的输入条件是不允许的。真值表中最后一行 S、R 的状态标识为"X"，这表示只要没有上升沿出现，S、R 的值就不会对输出产生影响。图 6-9 给出了一个时序图，在第一个时钟信号上升沿，R 为 1、S 为 0，输出复位(Q=0)；第二个时钟信号上升沿，R 为 0 且 S 为 1，输出置位(Q=1)。

表 6-5　上升沿触发 RS 触发器真值表

S	R	时钟信号	Q	$\overline{Q}$
0	0	↑	Q_0	$\overline{Q_0}$
1	0	↑	1	0
0	1	↑	0	1
1	1	↑	NA	
X	X	0，1，↓	Q_0	$\overline{Q_0}$

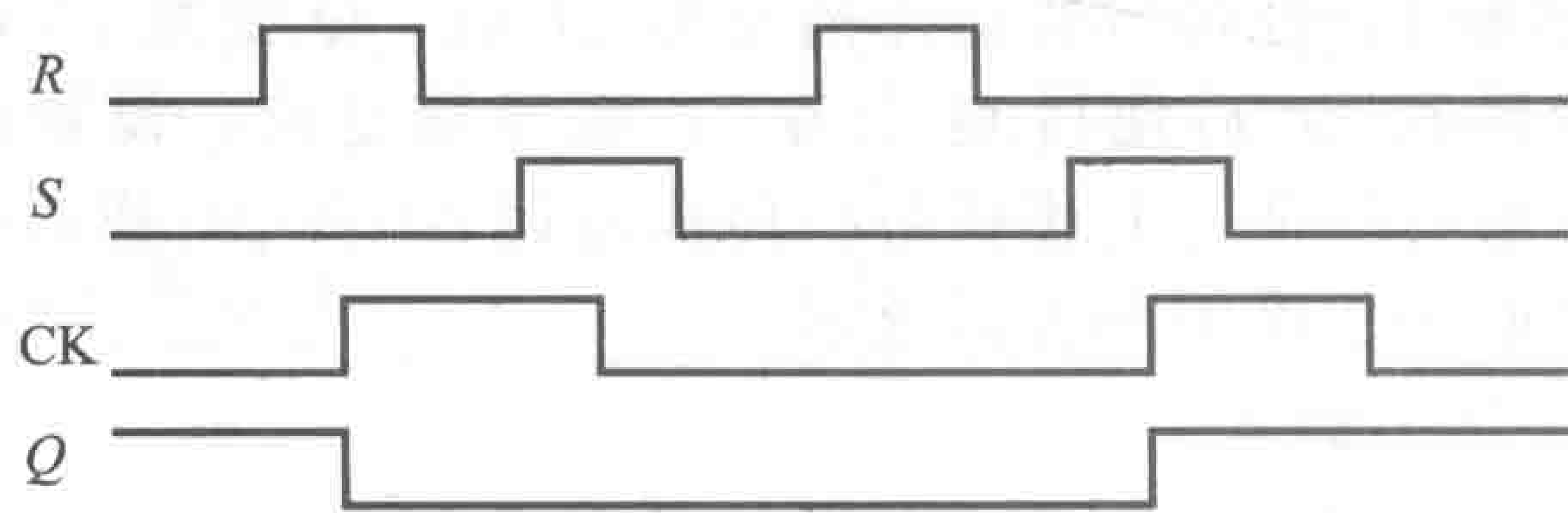


图 6-9 上升沿触发型 RS 触发器时序图

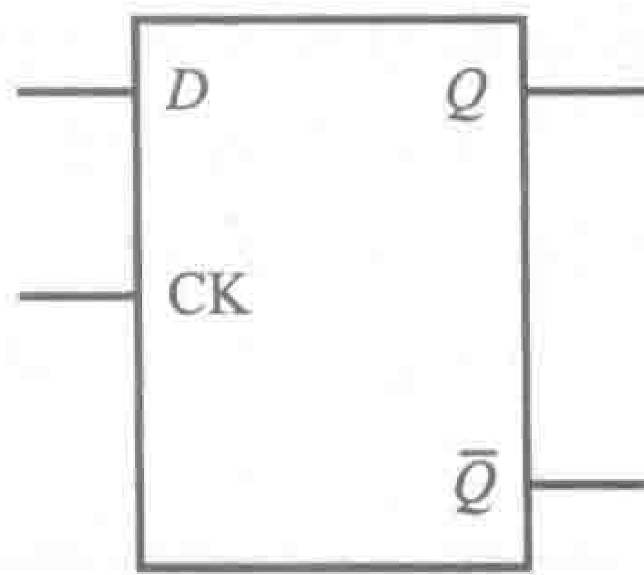


图 6-10 锁存器

有的特殊器件不属于边沿触发型。一个重要的例子是**锁存器**，其原理图符号如图 6-10 所示，只要时钟信号为高，输出 Q 就跟随输入 D 的变化。时钟下降沿出现时(即时钟信号变为低)，触发器存储(锁存)D 在下降沿时的值，并维持不变。由于时钟为高时，输出跟随输入的变化，此时称该锁存器是**透明的**。锁存器也可称之为正电平触发器件。

表 6-6 锁存器真值表

D	时钟信号	Q	$\overline{Q}$
0	1	0	1
1	1	1	0
X	0	Q_0	$\overline{Q_0}$

表 6-6 所示为锁存器的真值表，其时序图见图 6-11，注意观察输出 Q 在时钟电平为高时是如何跟踪输入 D 的。真值表最后一行中的 X 表示时钟信号为低时，D 的状态对输出无影响。

6.9.2 异步输入

触发器可以具有预置和清除功能，其优先级高于任何其他输入，它们可在任意时刻起作用而无须时钟信号触发，故称为**异步输入**。**预置**输入用于设置或初始化触发器的输出 Q 状态为高(1)。清除输入用于清除或重置触发器的输出 Q 为低(0)。图 6-12 所示的异步输入端的反相符号是大多数器件的典型配置，它意味着异步输入信号为低时，其功能生效。这类输入称为**低有效**输入。预置和清除输入不应同时生效。这两种输入都可以在通电后定义触发器的状态，否则触发器通电后的输出是不确定的。

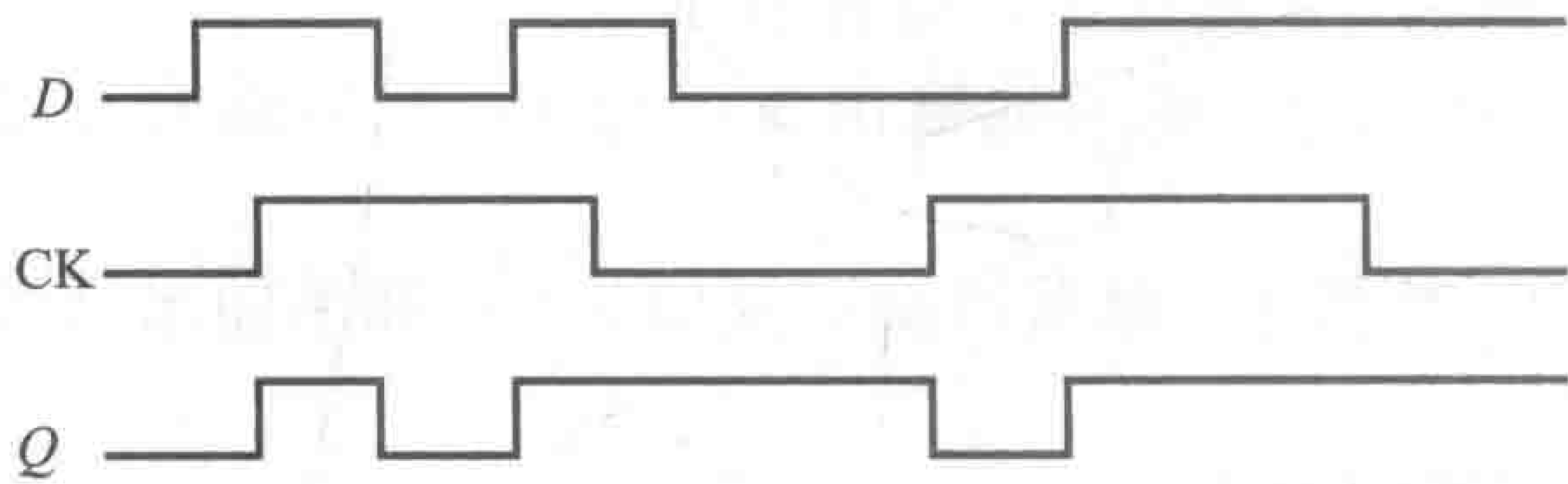


图 6-11 锁存器时序图

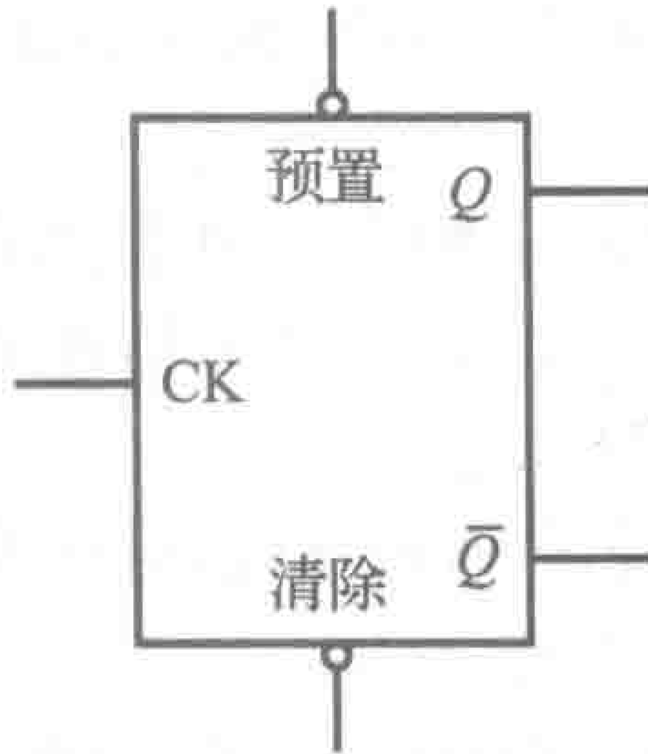


图 6-12 带有预置和清除功能的触发器

6.9.3 D触发器

D 触发器也称为数据触发器，只有一个输入 D，当时钟沿出现时，输入 D 存储并出现在 Q 输出端。上升沿触发型 D 触发器如图 6-13 所示，其真值表如表 6-7 所示。与锁存器不同，D 触发器是非透明的，其输出只有在合适的时钟沿(此例为上升沿)触发下才会发生变化。

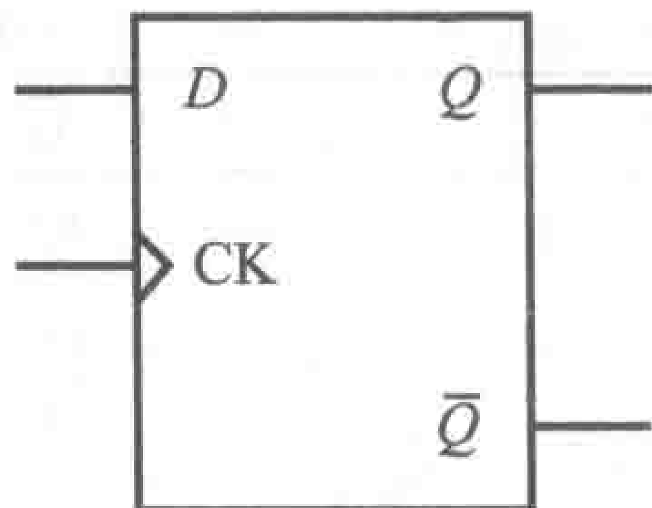


图 6-13 上升沿触发型 D 触发器

表 6-7 上升沿触发型 D 触发器真值表

D	CK	Q	$\overline{Q}$
0	↑	0	1
1	↑	1	0
X	0	Q_0	$\overline{Q_0}$
X	1	Q_0	$\overline{Q_0}$

实验练习 7 探讨了锁存器和 D 触发器之间的差异，该练习还讨论了逻辑门并展示了如何将开关作为输入接入逻辑电路中。

6.9.4 JK 触发器

JK 触发器类似于 RS 触发器，J 输入类似于 S(置位)输入，K 类似于 R(复位)输入。两者之间的主要区别在于输入 J 和 K 可以同时为高，该状态会导致输出**切换**，即输出值发生改变(1 变为 0，0 变为 1)。下降沿触发型 JK 触发器的原理图和真值表分别见图 6-14 和表 6-8。真值表的前两行描述了初始化触发器输出状态的预置或清除操作功能。预置和清除输入是低有效的并且优先于其他输入。第三行同时排除了预置和清除操作。符号↓表示时钟下降沿，它可以导致输出发生变化。最后一行描述了在没有下降沿触发情况下触发器的记忆特性。

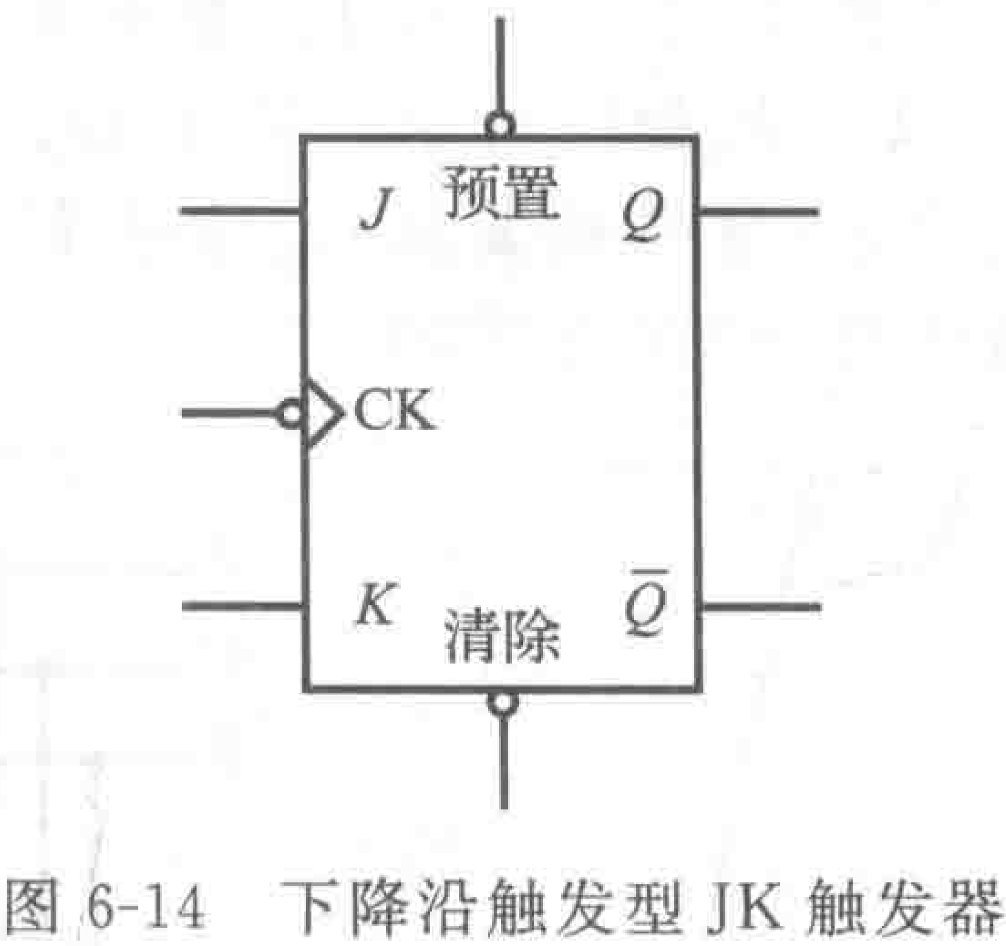


图 6-14 下降沿触发型 JK 触发器

表 6-8 下降沿触发型 JK 触发器的真值表

$\overline{预置}$	$\overline{清除}$	CK	J	K	Q	$\overline{Q}$
0	1	X	X	X	1	0
1	0	X	X	X	0	1
0	0			NA		
1	1	↓	0	0	Q_0	$\overline{Q_0}$
1	1	↓	1	0	1	0
1	1	↓	0	1	0	1
1	1	↓	1	1	$\overline{Q_0}$	Q_0
1	1	0, 1	X	X	Q_0	$\overline{Q_0}$

JK 触发器应用广泛，可以很容易地通过适当的外部连线将 JK 触发器变为其他类型的触发器，**T(翻转)触发器**是一个很好的例子。上升沿触发型 T 触发器及其等效的 JK 触发器实现如图 6-15 所示。T 触发器根据其时钟触发翻转输出状态，预置和清除功能对 T 触发器是必需的，以使它们直接控制输出的状态，因为 T 输入为输出单独提供初始化，表 6-9 给出了其真值表。

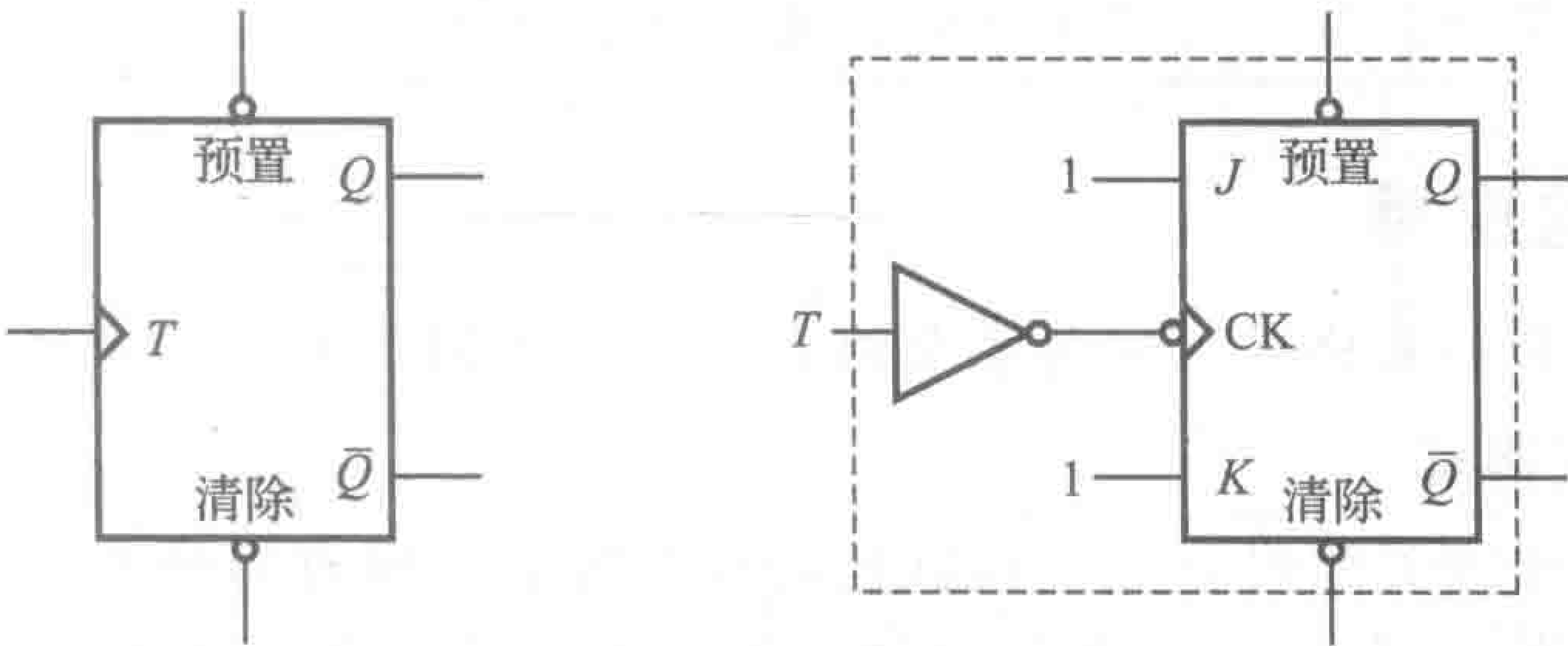


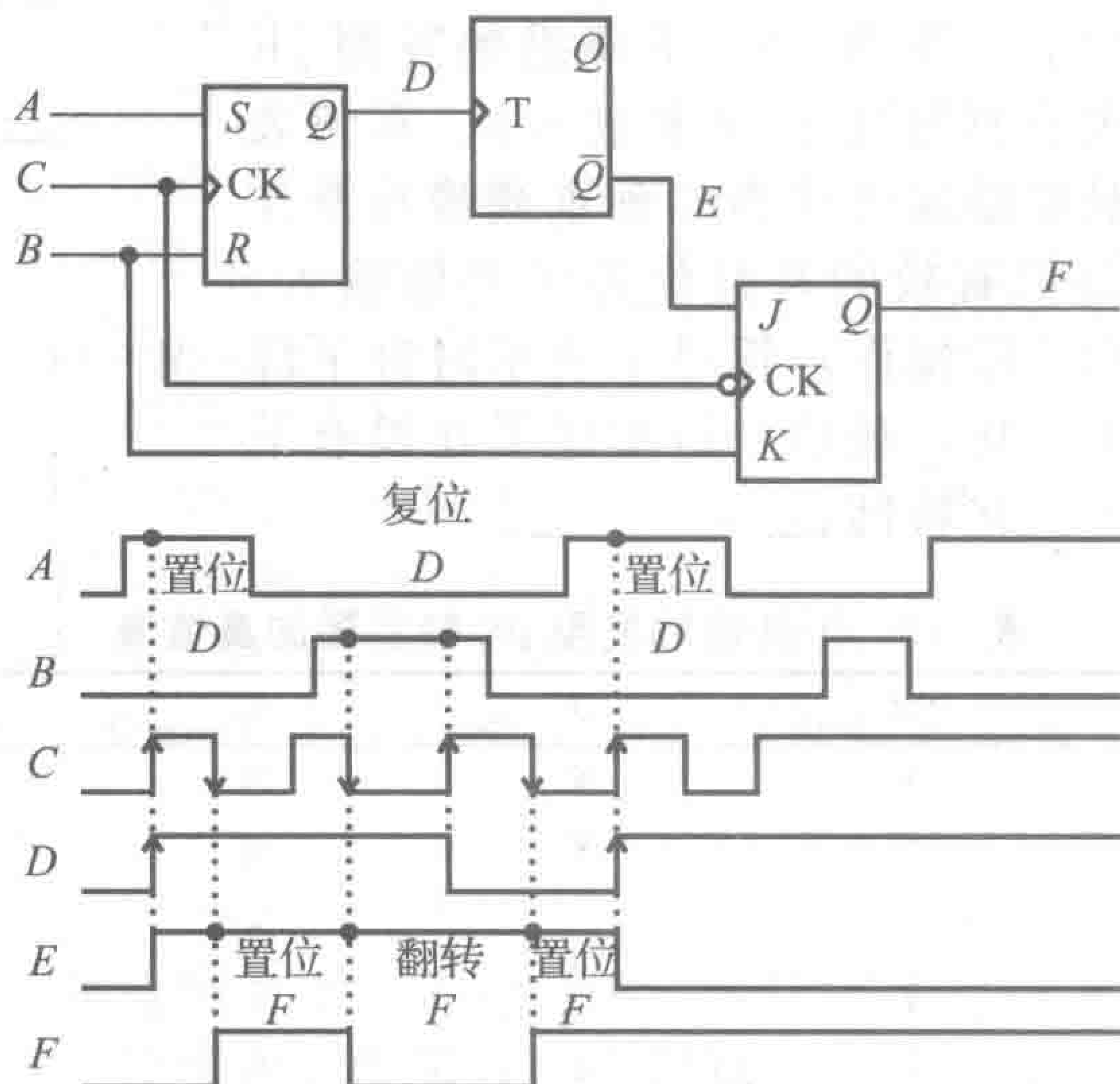
图 6-15 上升沿触发型 T 触发器

表 6-9 上升沿触发型 T 触发器真值表

T	$\overline{预设}$	$\overline{清除}$	Q	$\overline{Q}$
↑	1	1	$\overline{Q_0}$	Q_0
0	1	1	Q_0	$\overline{Q_0}$
1	1	1	Q_0	$\overline{Q_0}$
X	0	1	1	0
X	1	0	0	1

例 6.5　触发器电路的时序图

包括 RS、T 和 JK 触发器的时序逻辑电路如下所示，其输入 A、B、C 及其数字输出 D、E、F 如图所示。信号 D、E、F 在时序图初始位置时状态为低。观察信号 D 在 C 的上升沿(置位或复位)、信号 E 在 D 的上升沿(翻转)和信号 F 在 C 的下降沿(置位、复位或翻转)是如何变化的。



课堂讨论项目 6.5　JK 触发器时序图

绘制下降沿触发型 JK 触发器的时序图，要求能够完整展现其功能。

课堂讨论项目 6.6　计算机存储器

根据你所了解的触发器知识，讨论计算机随机存取存储器(RAM)是如何工作的。当你第一次打开计算机时，你认为 RAM 将会发生什么变化？

6.10　触发器的应用

触发器的类型多种多样。下面各小节将介绍一些使用触发器作为功能单元的应用。

6.10.1　消除开关抖动

机械开关在打开或关闭时，由于机械抖动或电弧会导致有短暂的电流振荡。这种现象称为**开关抖动**。如图 6-16 所示，单次闭合开关会导致多次电压跳变，通常这一过程发生在几毫秒内。视频演示 6.2 通过示波器直接展示了开关是如何抖动的。视频演示 6.3 展示了高压开关打开或关闭时非常生动的电弧现象。在这种情况下，一个大容量隔离开关断开电力线时，会导致很大的电弧。

图 6-17 所示的时序逻辑电路可以用于消除开关抖动，并产生无抖动的输出。当开关从触点 B 断开时，在 B 线上出现信号抖动，开关从触点 B 移动到触点 A 有一个小的时间延迟，当开关与触点 A 接触时，在 A 线上也会出现信号抖动。尽管如此，由于信号反馈及电路逻辑的作用使得输出信号 Q 只出现一次由低到高的变化(即输出无抖动)。该电路的功能与触发器十分类似(见课堂讨论项目 6.7)。

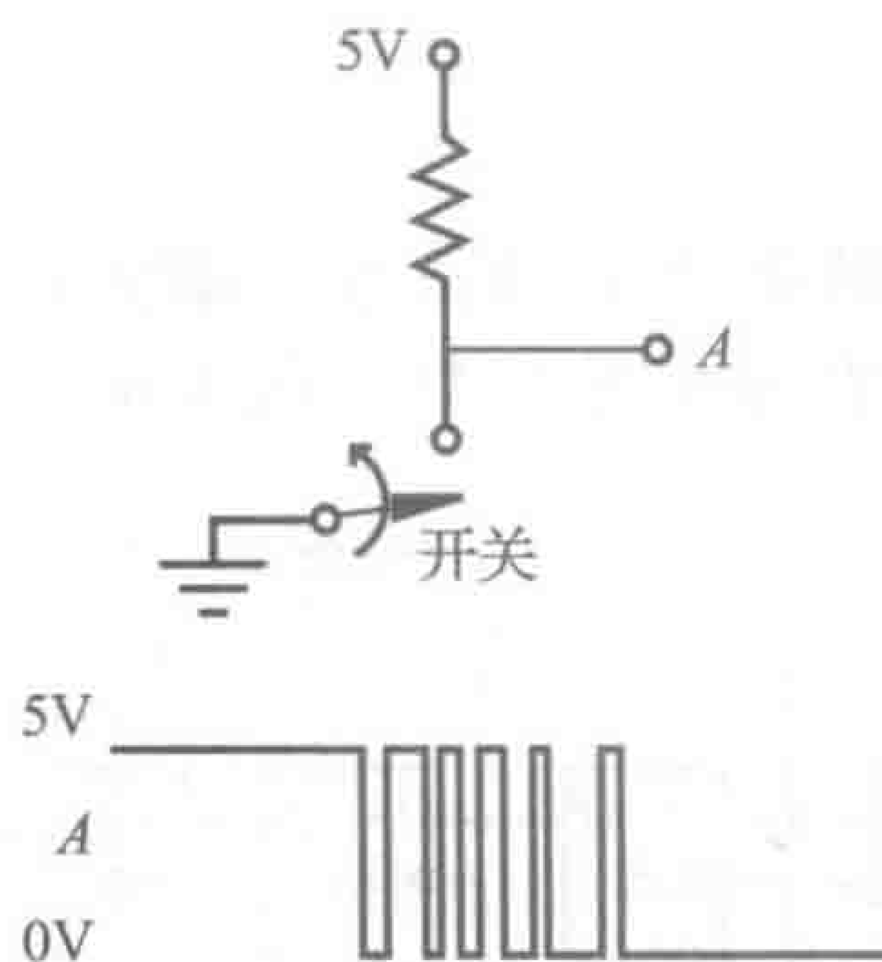


图 6-16 开关抖动

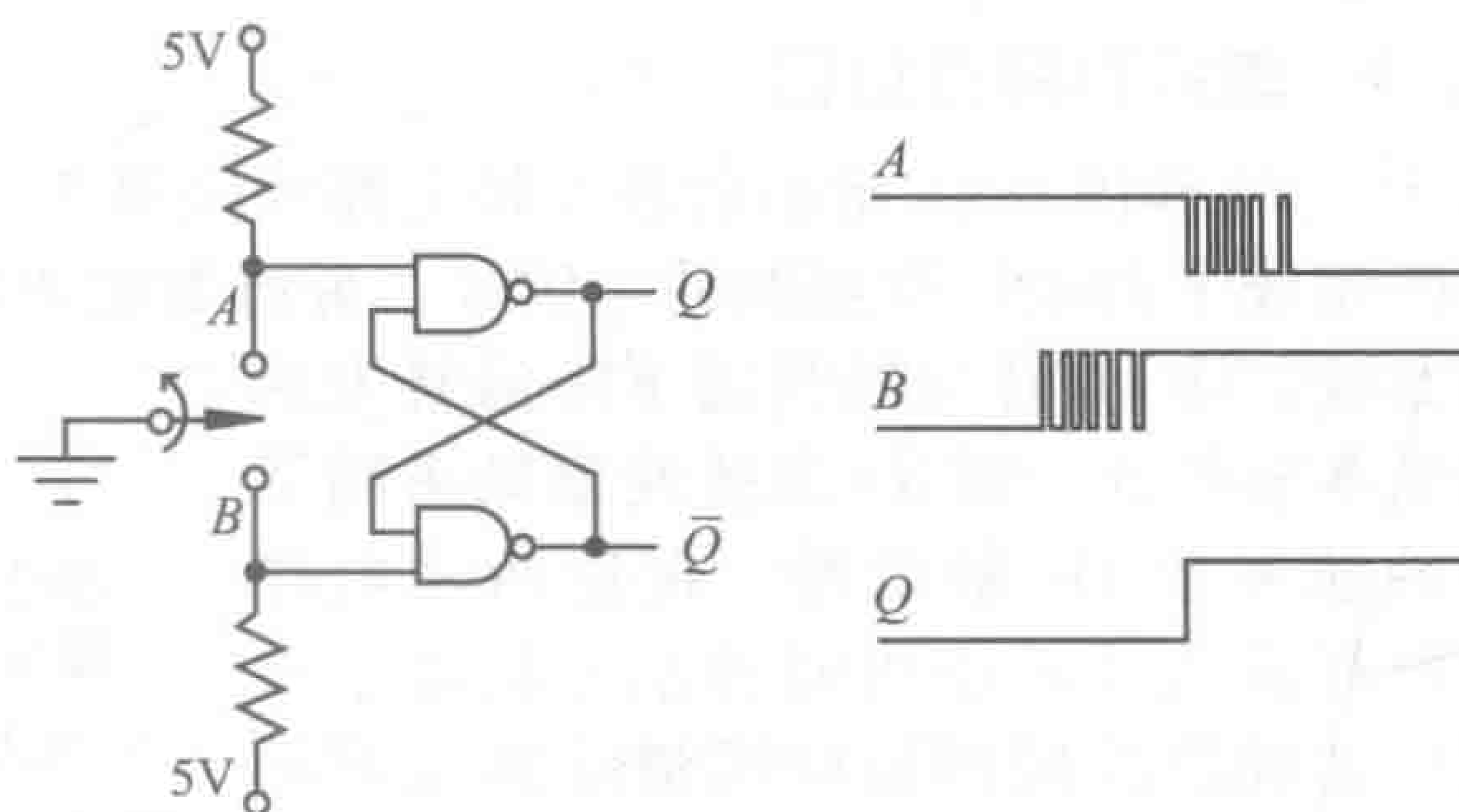


图 6-17 开关防抖电路

课堂讨论项目 6.7 开关防抖功能

分析图 6-17，当开关由触点 B 移向触点 A 时，考虑两个与非门输入和输出的变化，并绘制时序图。同时，绘制等效的 RS 触发器防抖动电路。提示：考虑图 6-17 所示的逻辑门开关延迟。

图 6-17 所示的开关称为单刀双掷开关(SPDT，更多信息参见 9.2.1 节)。一个单刀双掷开关有 3 根引线。6.12.2 节介绍了一种可用于 SPST(单刀单掷)开关的防抖动电路，它只有两根引线。课堂讨论项目 7.8 还将探索如何使用单片机软件来消除开关输入的抖动，如果设计中包含有单片机，这将是最有效的解决方案。

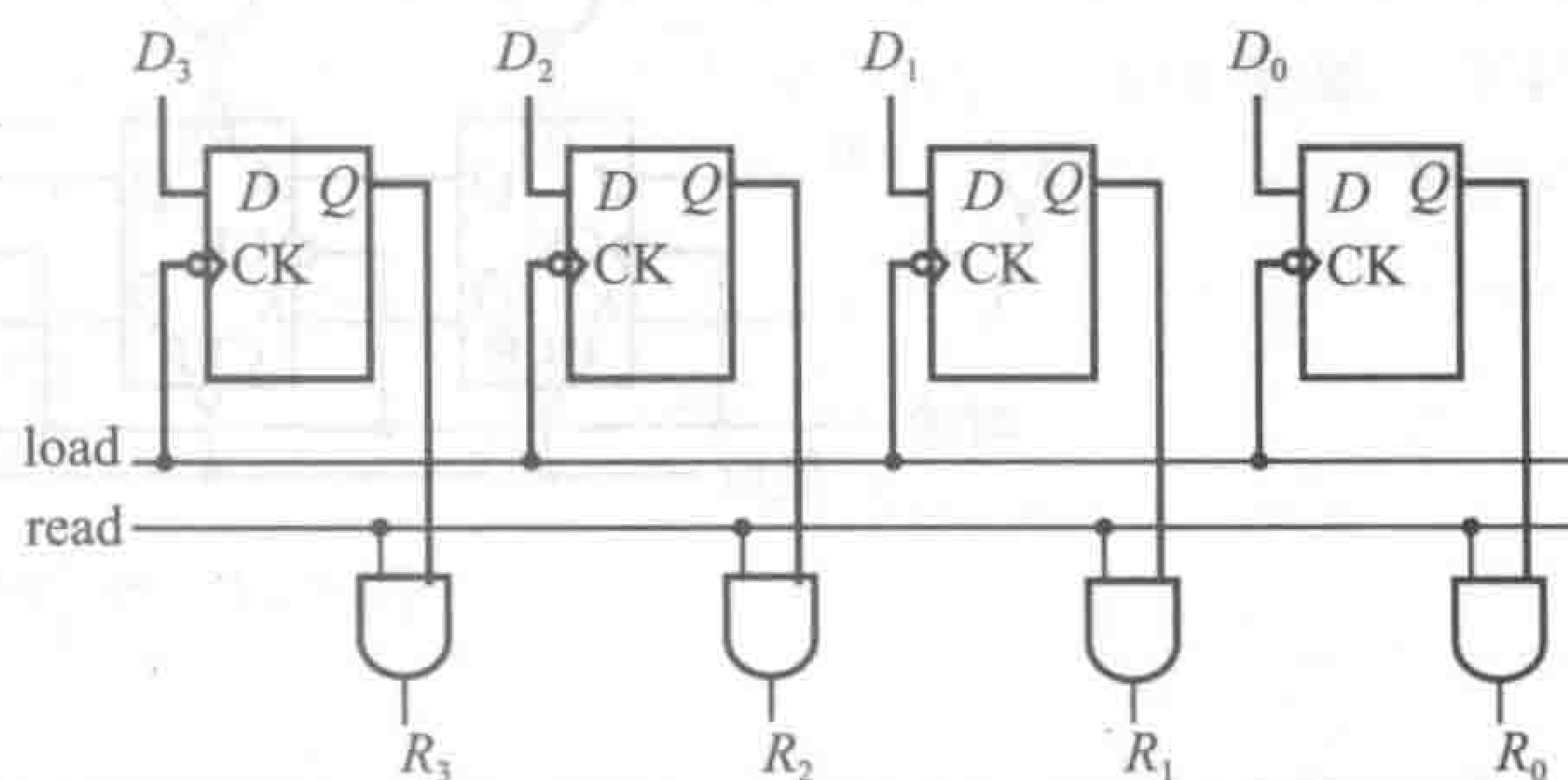


图 6-18 4 位数据寄存器

6.10.2 数据寄存器

图 6-18 所示为由下降沿触发型 D 触发器组成的 4 位**数据寄存器**，它将数据线上的数据传送至 4 个与门输出。数据传送包括两步，首先，在 load 信号的下降沿将数据值 D_i 传输至触发器的 Q 输出端。然后，read 线上的高脉冲使 Q 输出出现在寄存器的与门输出 R_i 上。数据寄存器在微处理器中存储计算所用的数据，它可以通过级联实现更多位的存储。

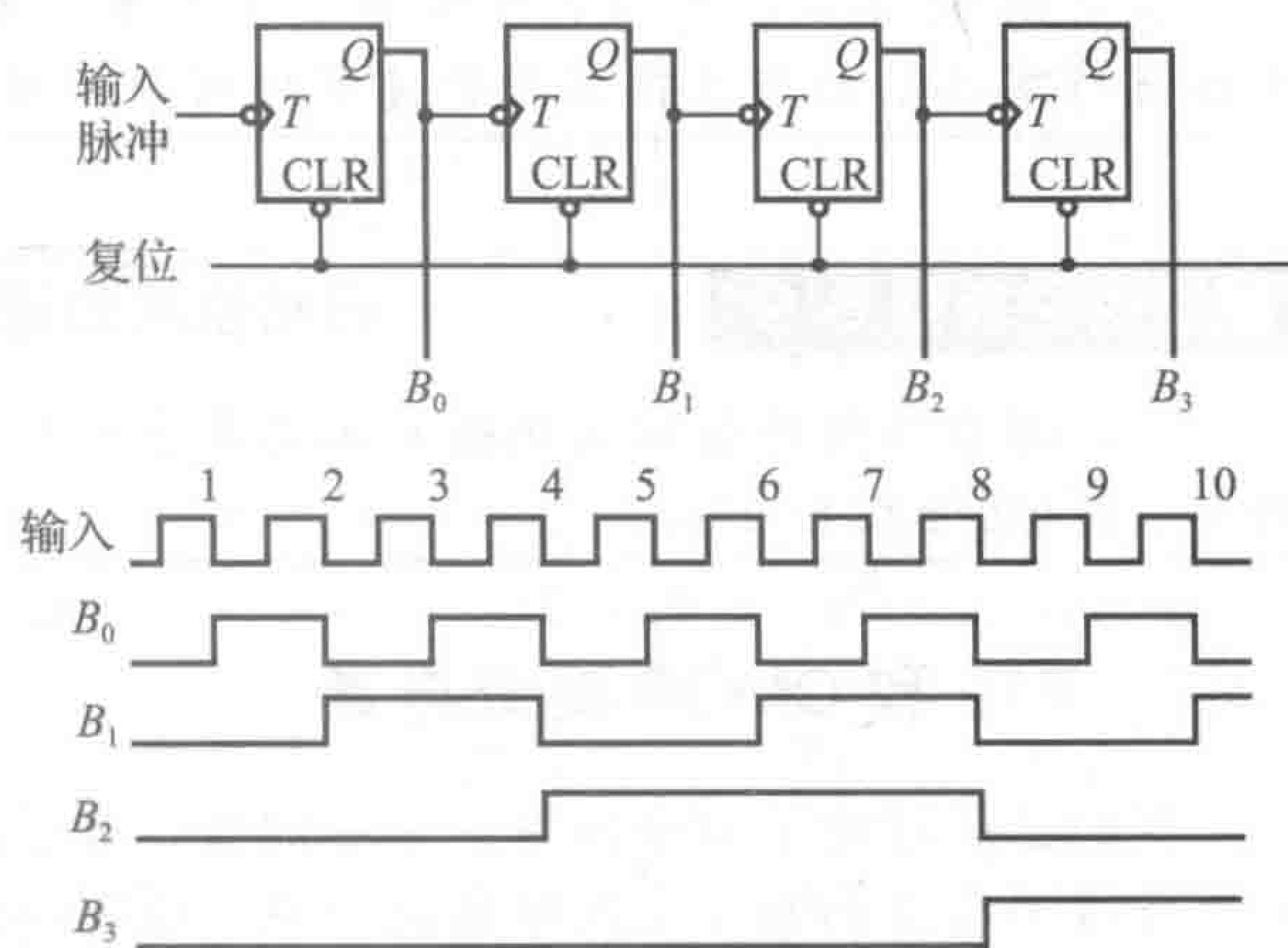


图 6-19 4 位二进制计数器

6.10.3 二进制计数器和分频器

图 6-19 所示为 4 个依次连接的由下降沿触发型 T 触发器构成的 4 位**二进制计数器**。同时给出了前十个输入脉冲的时序图。4 个输出位 B_i 按二进制计数序列变化，即从 0($B_3B_2B_1B_0=0000$)，1($B_3B_2B_1B_0=0001$)，…，一直计数至 15($B_3B_2B_1B_0=1111$)后再回到 0 值。该电路也可用作**分频器**。输出 B_0 是二分频输出，其频率为输入脉冲序列频率的 1/2。B_1、B_2 和 B_3 则

分别为四、八和十六分频。

6.10.4　串行和并行接口

图 6-20 和图 6-21 给出的触发器电路可实现串行和并行数据之间的转换。**串行数据**由一根数据线上的位序列或脉冲串组成。**并行数据**由同时出现在多根并行数据线上的一组数据位组成。串-并转换器利用下降沿触发的 D 触发器来实现，而并-串转换器则采用了下降沿触发型 JK 触发器。在这两种电路中，串行输入或输出由时钟信号同步。在数据位加载之前使用复位线清除触发器的状态，复位信号低有效，即当复位线为低时，触发器清除，输出 Q 变为低(0)。并-串转换中的 load(加载)线使得数据通过与非门，并使用触发器的低有效预置端，将数据值存储至触发器的输出。当 load 信号为高(1)，且并行位 P_i 为高(1)时，将使得相应的触发器输出预置为高(1)。图中仅显示了 4 位转换，但通过触发器的级联将可以实现更多位的转换。

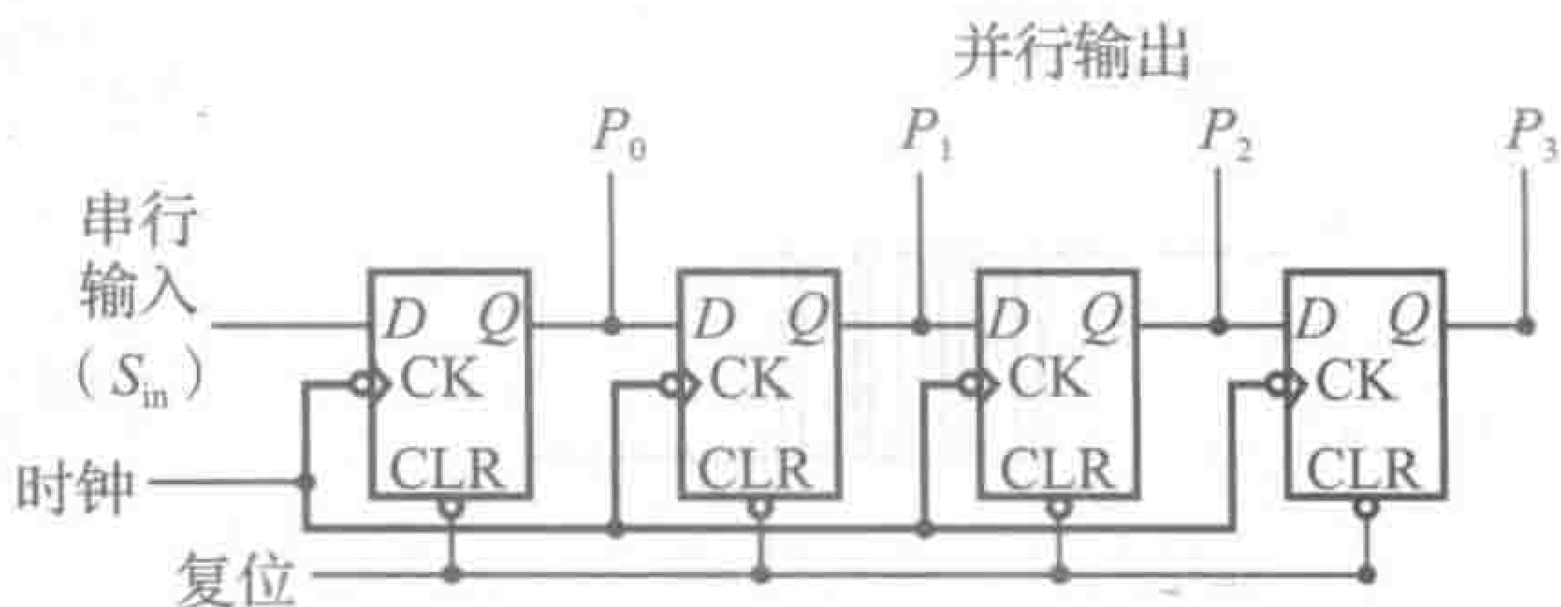


图 6-20　串-并转换器

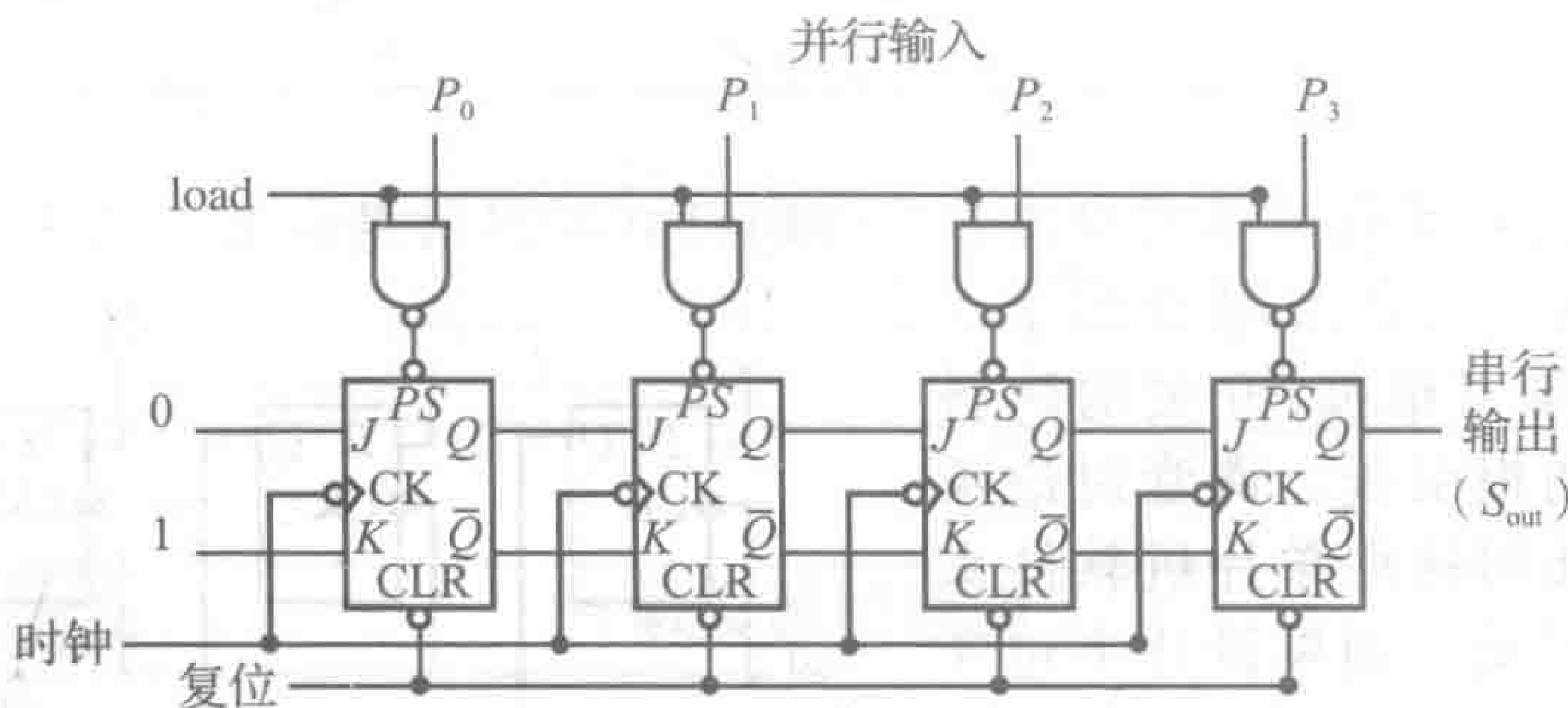


图 6-21　并-串转换器

课堂讨论项目 6.8　串行和并行数据之间的转换

观察图 6-20 和图 6-21，详细说明串行和并行数据转换电路的功能。同时，说明串行传输**波特率**(bit/s)与转换器时钟速度之间的关系。

课堂讨论项目 6.9　日常使用的逻辑设备

讨论组合和时序逻辑功能在日常物品中的应用。对于每个物品，说明其逻辑功能的目的和类型(组合或时序)。

6.11　TTL 和 CMOS 集成电路

我们已经讨论了数字信号、布尔代数、数字逻辑表达式和逻辑器件，下面开始介绍完成各种数字功能的实际集成电路的特点。逻辑器件分为 TTL 和 CMOS 两大类。TTL 表示**晶体管逻辑器件**，CMOS 表示**互补金属氧化物半导体器件**。一般来说，任何组合或时序逻辑电路都可以由一类或两类器件的组合来实现，但是为了正确连接两类器件，需要首先了解每类器件电子特性的差异。

第 3 章中介绍的双极型晶体管是 TTL 逻辑的基本组成单元，而 MOSFET 则是 CMOS 逻辑的基本组成单元。数字器件的两个状态通过处于特定的可接受范围内的电压来定义，

两类器件的状态及其电压范围如图6-22所示。尽管CMOS器件可以由3～18V的直流电源供电，但为了方便比较，假设两类器件都由5V直流电源供电。对TTL数字输入，**逻辑0或低**(L)定义为电压值小于0.8V，**逻辑1或高**(H)定义为电压值大于2.0V。TTL器件输出为低时其电压通常介于0～0.5V之间，输出为高时，电压介于2.7～5V。介于逻辑0和逻辑1之间的0.8～2.0V的输入电压为死区，其输入状态未定义。对于CMOS数字输入，逻辑0或低(L)定义为电压值小于1.5V，逻辑高定义为电压值大于3.5V。CMOS器件输出为低时典型的电压范围为0～0.01V，为高时典型的电压范围为4.95～5V。1.5～3.5V的输入电压为死区，其输入状态未定义。

当与数字器件互连时，除了要了解电平之外，了解设备的输入和输出的电流特性也是同样重要的。电流特性包括当器件输出为高时所能提供的**源电流**和当器件输出为低时所能吸收的**灌电流**。制造商提供的数字器件数据手册中源电流通常用I_{OH}或“高电平输出电流”来表示，灌电流通常用I_{OL}或“低电平输出电流”来表示。TTL和CMOS器件的数据手册示例如下文所示。

现在来研究TTL和CMOS器件的等效输出电路。参考图6-23，TTL逻辑通过正向偏置两个输出晶体管中的一个来实现输出状态的切换。这种输出电路称为**图腾柱**结构，其中两个双极型晶体管堆叠在电源和地之间。当上部晶体管正向偏置且底部晶体管关断时，输出为高，电路中的电阻、晶体管和二极管使得实际输出电压约拉低至3.4V的典型值。当底部晶体管正向偏置且上部晶体管关断时，输出为低。可以注意到，当输出为高时TTL器件输出源电流，而输出为低时吸入灌电流。TTL灌电流和源电流的大小取决于TTL子系列类型，当TTL器件的输出连接到另一器件的输入时，不管其输出为高还是低，TTL器件均将持续消耗功率。

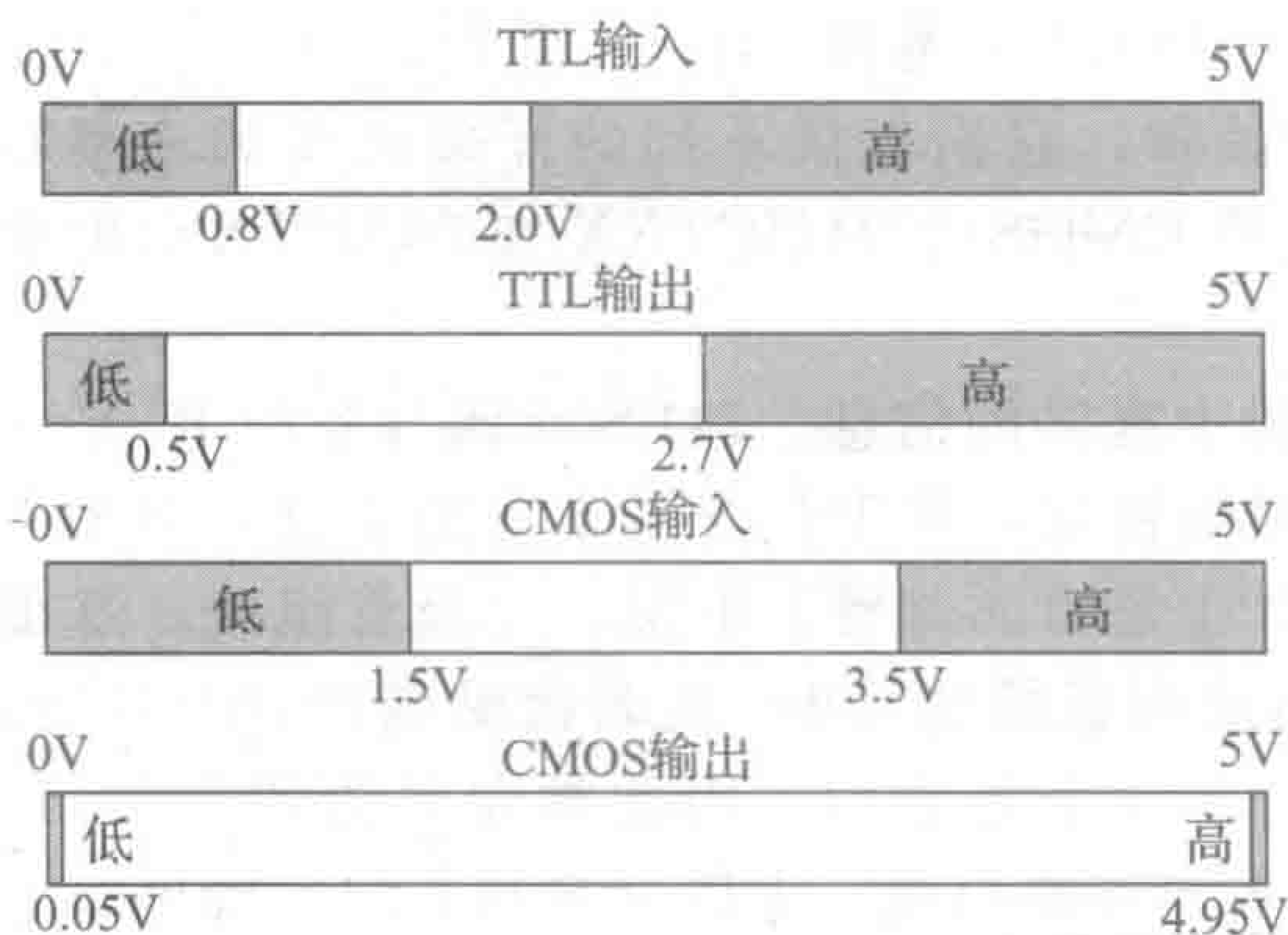


图6-22 TTL与CMOS的输入与输出电平

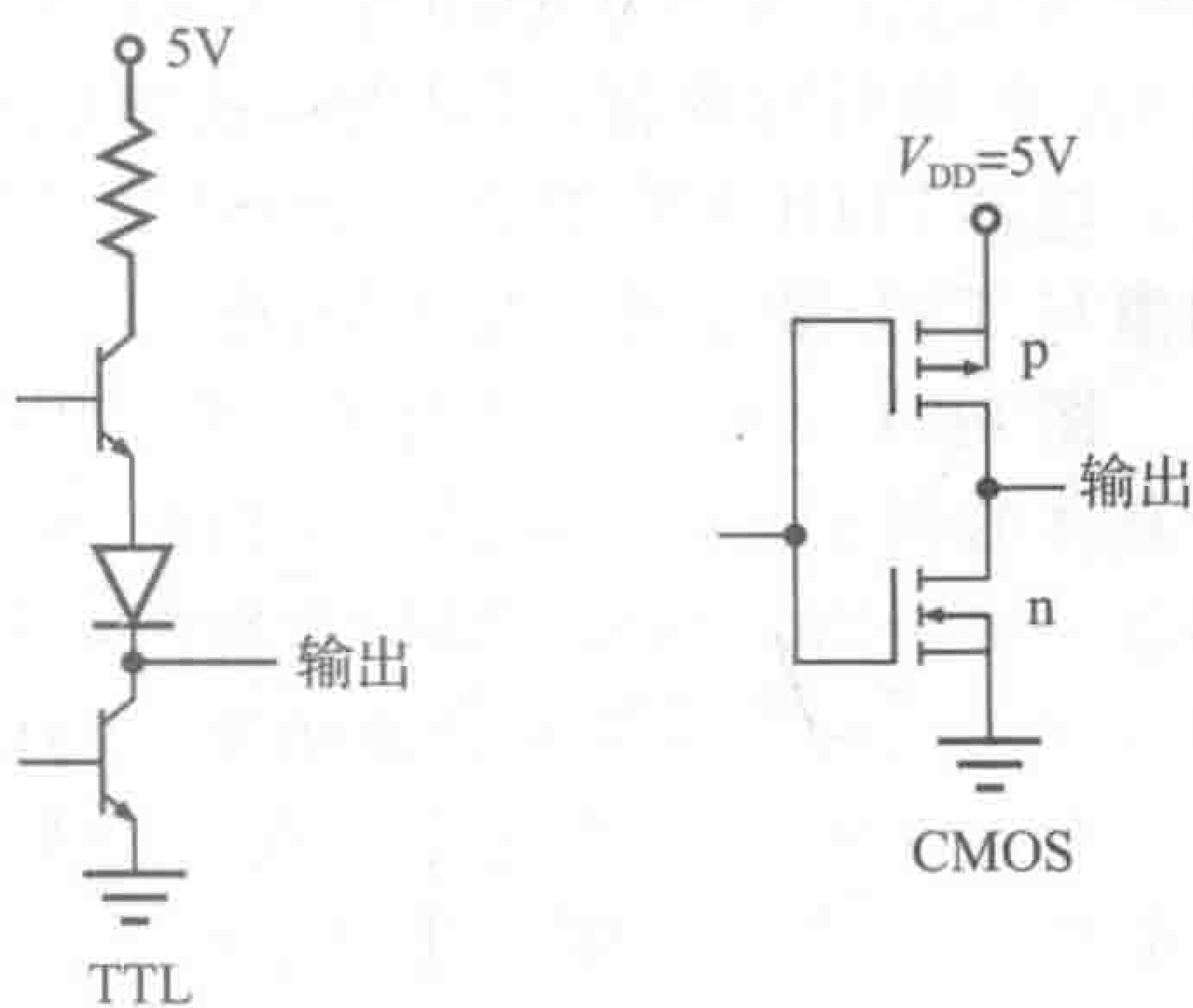


图6-23 TTL与CMOS输出电路

CMOS逻辑集成电路采用互补的P型和N型增强型MOS晶体管作为半导体的输出，因此得名为**互补金属氧化物半导体**(CMOS)。参考图6-23所示的CMOS输出电路，如果至该输出级的输入信号为高，则P型晶体管(顶部)关断，N型晶体管(底部)导通，输出下拉至低。当输入信号为低时，则顶部晶体管导通和底部晶体管关断，输出上拉为高。当输出为高时，器件提供源电流，当输出为低时，如果输出接有负载，则器件吸入电流。由于MOSFET门是绝缘的，只有当状态切换或接有负载时，CMOS器件才会消耗功率。因此CMOS和TTL之间的主要区别是TTL器件需要持续不断的功率供给(见课堂讨论项目6.10)。

通常优先推荐使用CMOS器件，其原因在于：

- 当输出无负载或连接到其他CMOS器件时，CMOS器件仅当切换输出的逻辑状态时才消耗功率，因此CMOS器件更适用于功率受限的由电池供电的系统。
- CMOS的电源范围宽(3～18V)，这提供了更多的设计灵活性，并允许使用非严格

稳压的电源供电。

CMOS 器件也存在一些缺点：

- CMOS 器件即使内部带有保护二极管，其对静电放电仍然很敏感。在处理和装配过程中需要保护性包装和静电放电，否则，器件很容易损坏。
- CMOS 器件需要的输入电流可以忽略不计，但其输出电流与 TTL 相比也较小。这限制了 CMOS 器件用于扇出驱动 TTL 器件或其他大电流设备的能力。

课堂讨论项目 6.10　CMOS 和 TTL 的功耗

研究图 6-23 所示的 TTL 和 CMOS 输出电路。解释为什么 TTL 器件连接到其他 TTL 器件时需要消耗功率以维持其输出电平，而当 CMOS 器件连接到其他 CMOS 器件时不需要消耗功率。

6.11.1　使用制造商 IC 数据手册

制造商提供的**数据手册**包含了他们所生产的所有器件的**数据手册**。数据手册包含使用这些器件设计电路的所有信息，其中有内部原理图、引脚连接、最大额定参数、工作条件及电气和开关特性。在 TTL 数据手册中器件的标识通常采用 AAxxyzz 格式，其中 AA 是制造商的前缀(SN 代表 TI 和其他公司，DM 代表美国国家半导体公司)；xx 用于区分是军用(xx=54)还是工业用(xx=74)器件；y 代表不同的内部设计(无字母：标准 TTL，L：低功率耗散型，H：高功率耗散型，S：肖特基型，AS：先进的肖特基型，LS：低功耗肖特基型，ALS：先进的低功耗肖特基型)；zz 为手册中的器件编号。肖特基型器件具有更快的开关速度和更小的功耗。CMOS 器件包括 40XXB 系列和 74CXX 系列。后者与 TTL 74XX 系列引脚兼容。74CXX 系列也有不同的品种，它们提供不同的开关速度和功率特性，包括 74HCXX(高速 CMOS)、74ACXX(先进 CMOS)、74HCTXX 和 74ACTXX(电平阈值与 TTL 兼容的高速 CMOS)。

图 6-24～图 6-26 给出了一些 TTL 数据手册中提供的信息。74LS00 四与非门 IC 是一个具体的例子。网络链接 6.4 指向整个数据手册的链接，其中包含了丰富的信息，但不少信息是多余的。类似于其他逻辑门，其内部设计也是由晶体管、电阻、二极管组成，这很容易在集成电路硅片上制造出来。74LS00 采用**双列直插式**(DIP)或**表面贴装**(SOP)封装，其引脚连接如图 6-25 所示。在一个硅片上封装了 4 个与非门，因此被命名为四与非门。如前所述，图 6-26 所示的两个重要的参数是源电流和灌电流。TTL-LS 与非门的输出源电流限值 I_{OH} 为−0.4mA，输出灌电流限值 I_{IH} 为 8mA。标准的惯例是将进入器件的电流方向定义为正方向。TTL 器件的灌电流通常远远超出其源电流。

课堂讨论项目 6.11　与非魔术

虽然图 6-24 所示的与非门电路要比前文给出的基本晶体管电路复杂得多，说明此电路如何能够实现与非逻辑。

图 6-27 和图 6-28 给出了一些 CMOS 数据手册中提供的信息。4011B 四与非门 IC 是一个典型的例子。网络链接 6.5 指向整个数据手册的链接。CMOS 输出由两个互补的 FET 组成，高输出接近电源电压，低输出接近地电平。正电源标记为 V_{DD}，低端(通常接地)标记为 V_{SS}。如图 6-28 所示，CMOS 与非门的供电电压为 5V 时，其源电流和灌电流为 1mA。

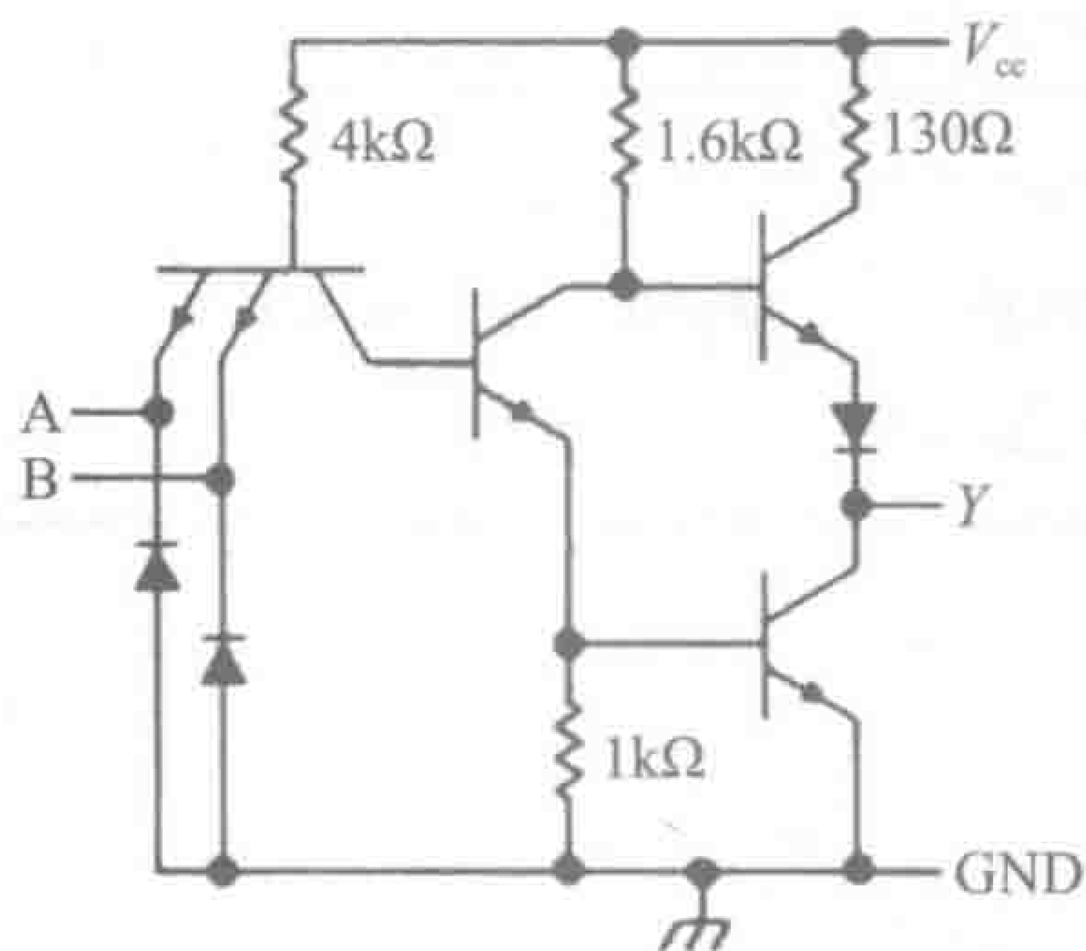


图 6-24 与非门的内部设计(资料来源：德州仪器公司)

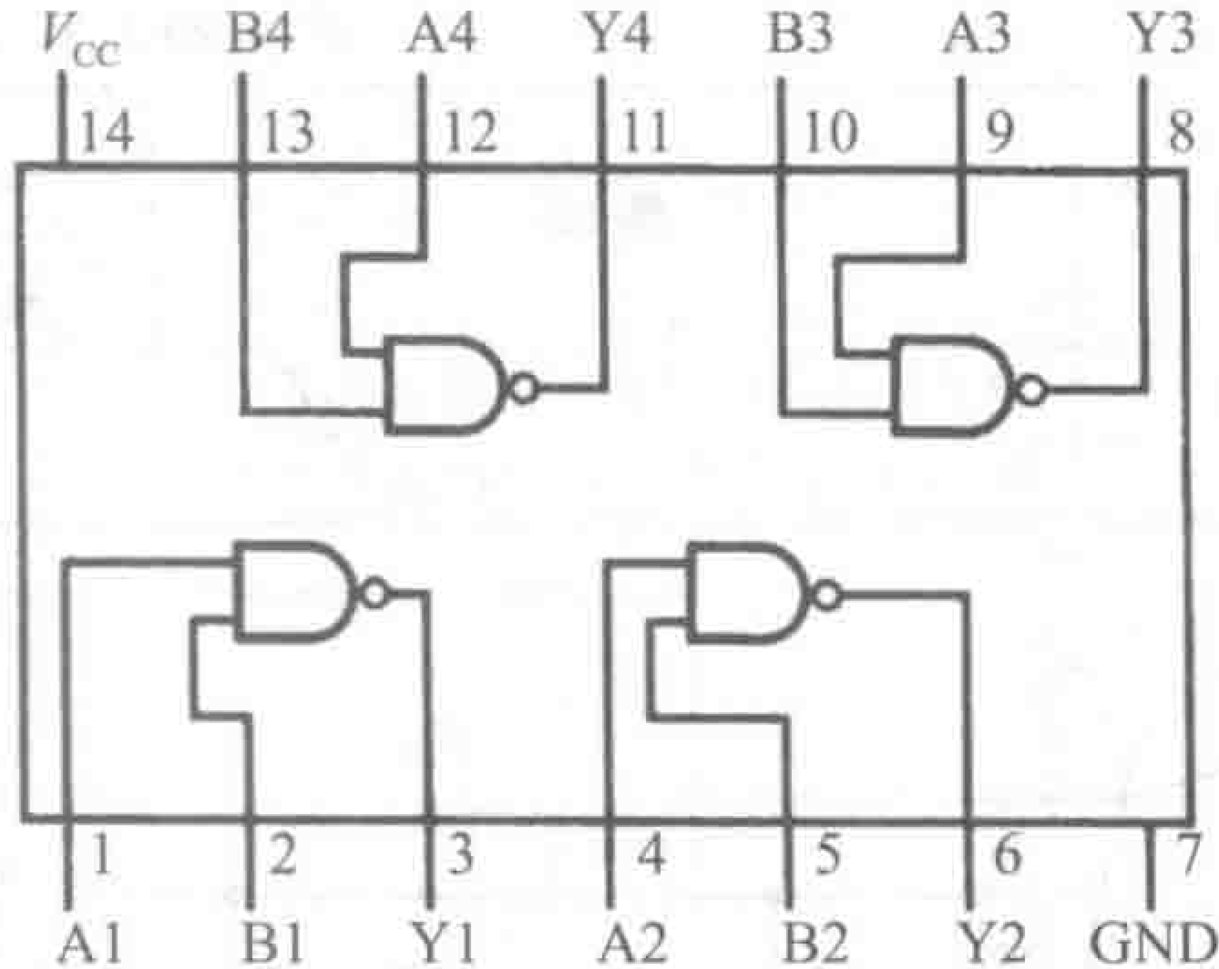


图 6-25 四与非门 IC 引脚连接图(资料承蒙美国国家半导体公司提供)

绝对最大额定参数(注：绝对最大额定值是指超出这些值后器件的安全性无法保证，器件不应工作于这些限值处。在“电气特性”中给出的参数值在绝对最大额定值下无法得到保证。“推荐工作条件”表给出了器件实际工作时的电气条件。)

如果需要军事/航天专用器件，请联系美国国家半导体销售办事处和经销商了解其供货和规格。

电源电压 7V

输入电压 7V

工作温度范围

DM54LS 和 54LS　　−55～125℃

DM74LS　　0～70℃

存储温度范围　　−65～150℃

推荐工作条件

符号	参数	DM54LS00			DM74LS00			单位
		最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	
V_{CC}	电源电压	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V_{IH}	高电平输入电压	2			2			V
V_{IL}	低电平输入电压			0.7			0.8	V
I_{OH}	高电平输出电流			−0.4			−0.4	mA
I_{OL}	低电平输出电流			4			8	mA
T_A	工作温度	−55		125	0		70	℃

电气特性(除非特别指明，参数覆盖推荐工作温度范围)

符号	参数	状态		最小值	典型值	最大值	单位
V_I	输入钳位电压	V_{CC}为最小值，$I_I=-18$mA				−1.5	V
V_{OH}	高电平输出电压	V_{CC}为最小值 I_{OL}为最大值 V_{IL}为最大值	DM54	2.5	3.4		V
			DM74	2.7	3.4		
V_{OH}	低电平输出电压	V_{CC}为最小值 I_{OL}为最大值 V_{IH}为最小值	DM54		0.25	0.4	V
			DM74		0.35	0.5	
		$I_{OL}=4$mA V_{CC}为最小值	DM74		0.25	0.4	
I_I	输入电流@最大输入电压	V_{CC}为最大值，$V_I=7$V				0.1	mA
I_{IH}	高电平输入电流	V_{CC}为最大值，$V_I=2.7$V				20	μA
I_{IL}	低电平输入电流	V_{CC}为最大值，$V_I=0.4$V				−0.36	mA
I_{OS}	短路输出电流	V_{CC}为最大值	DM54	−20		−100	mA
			DM74	−20		−100	
I_{CCH}	高输出时的电源电流	V_{CC}为最大值			0.8	1.6	mA
I_{CCL}	低输出时的电源电流	V_{CC}为最大值			2.4	4.4	mA

图 6-26 DM74LS00 与非门 IC 数据手册(资料承蒙美国国家半导体公司提供)

开关特性($V_{CC}=5V$，$T_A=25℃$)

符号	参数	$R_L=2kΩ$				单位
		$C_L=15pF$		$C_L=50pF$		
		最小值	最大值	最小值	最大值	
t_{PLH}	输出从低到高时的传播延迟时间	3	10	4	15	ns
t_{PHL}	输出从高到低时的传播延迟时间	3	10	4	15	ns

图 6-26 （续）

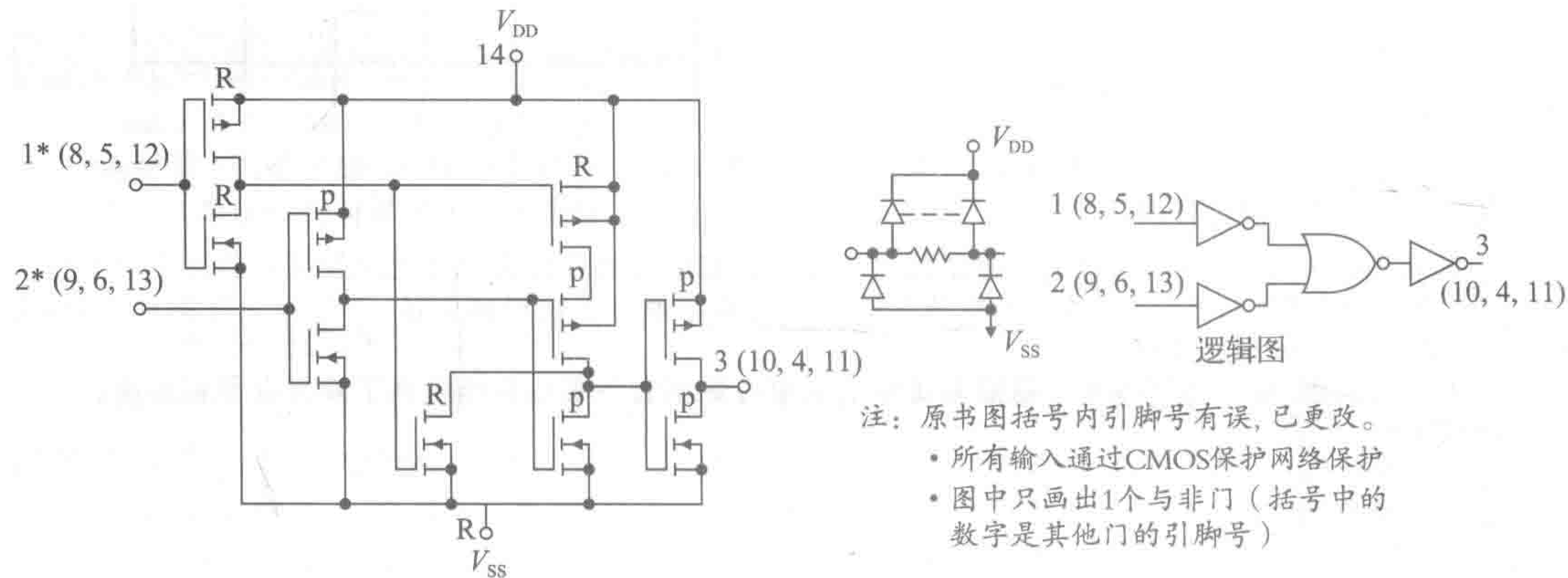


图 6-27　CMOS 4011B 与非门的内部设计(资料承蒙德州仪器公司提供)

静态电气特性

特性	条件			指定温度条件下的极限值							单位
	V_O	V_{IN}	V_{DD}					+25			
	(V)	(V)	(V)	−55	−40	+85	+125	最小值	典型值	最大值	
器件的静态电流最大值 I_{DD}	—	0.5	5	0.25	0.25	7.5	7.5	—	0.01	0.25	μA
	—	0.10	10	0.5	0.5	15	15	—	0.01	0.5	
	—	0.15	15	1	1	30	30	—	0.01	1	
	—	0.20	20	5	5	150	150	—	0.02	5	
低输出(灌)电流最小值 I_{OL}	0.4	0.5	5	0.64	0.61	0.42	0.36	0.51	1	—	mA
	0.5	0.1	10	1.6	1.5	1.1	0.9	1.3	2.6	—	
	1.5	0.15	15	4.2	4	2.8	2.4	3.4	6.8	—	
高输出(源)电流最小值 I_{OH}	4.6	0.5	5	−0.64	−0.61	−0.42	−0.36	−0.51	−1	—	
	2.5	0.5	5	−2	−1.8	−1.3	−1.15	−1.6	−3.2	—	
	9.5	0.1	10	−1.6	−1.5	−1.1	−0.9	−1.3	−2.6	—	
	13.5	0.15	15	−4.2	−4	−2.8	−2.4	−3.4	−6.8	—	
低电平输出电压最大值 V_{OL}	—	0.5	5	0.05				—	0	0.05	V
	—	0.1	10	0.05				—	0	0.05	
	—	0.15	15	0.05				—	0	0.05	
高电平输出电压最小值 V_{OH}	—	0.5	5	4.95				4.95	5	—	
	—	0.10	10	9.95				9.95	10	—	
	—	0.15	15	14.95				14.95	15	—	
低输入电压最大值 V_{IL}	4.5	—	5	1.5				—	—	1.5	V
	9	—	10	3				—	—	3	
	13.5	—	15	4				—	—	4	
高输入电压最小值 V_{IH}	0.5，4.5	—	5	3.5				3.5	—	—	
	1.9	—	10	7				7	—	—	
	1.5，13.5	—	15	11				11	—	—	
输入电流最大值 I_{IN}		0.18	18	±0.1	±0.1	±1	±1	—	$±10^{-5}$	±0.1	μA

图 6-28　CMOS 4011B 与非门 IC 数据表(来自于德州仪器公司)

6.11.2 数字集成电路的输出配置

TTL器件通常会使用3种不同类型的输出电路。最常见的是**图腾柱**结构，两个晶体管堆叠在电源和地之间，如图6-23和图6-24所示。第二种类型的输出电路常称为**集电极开路输出**。如图6-29所示，这种结构需要一个连接到电源的外部**上拉电阻**来产生输出状态。当输出晶体管饱和（打开）时，V_{out}为低，当输出晶体管截止（关闭）时，V_{out}为高。具有这种输出类型的器件包括：7401、7403、7405及7406。第三种类型的输出电路称为**三态输出**，有一个额外的输入信号控制第三种输出状态。当该状态使能时，第三种状态会产生一个高输出阻抗，它有效地断开输出与任何电路的连接。这允许将多个设备同时连接到一根信号线上，同一时刻只有一个设备的输出使能（如计算机总线）。

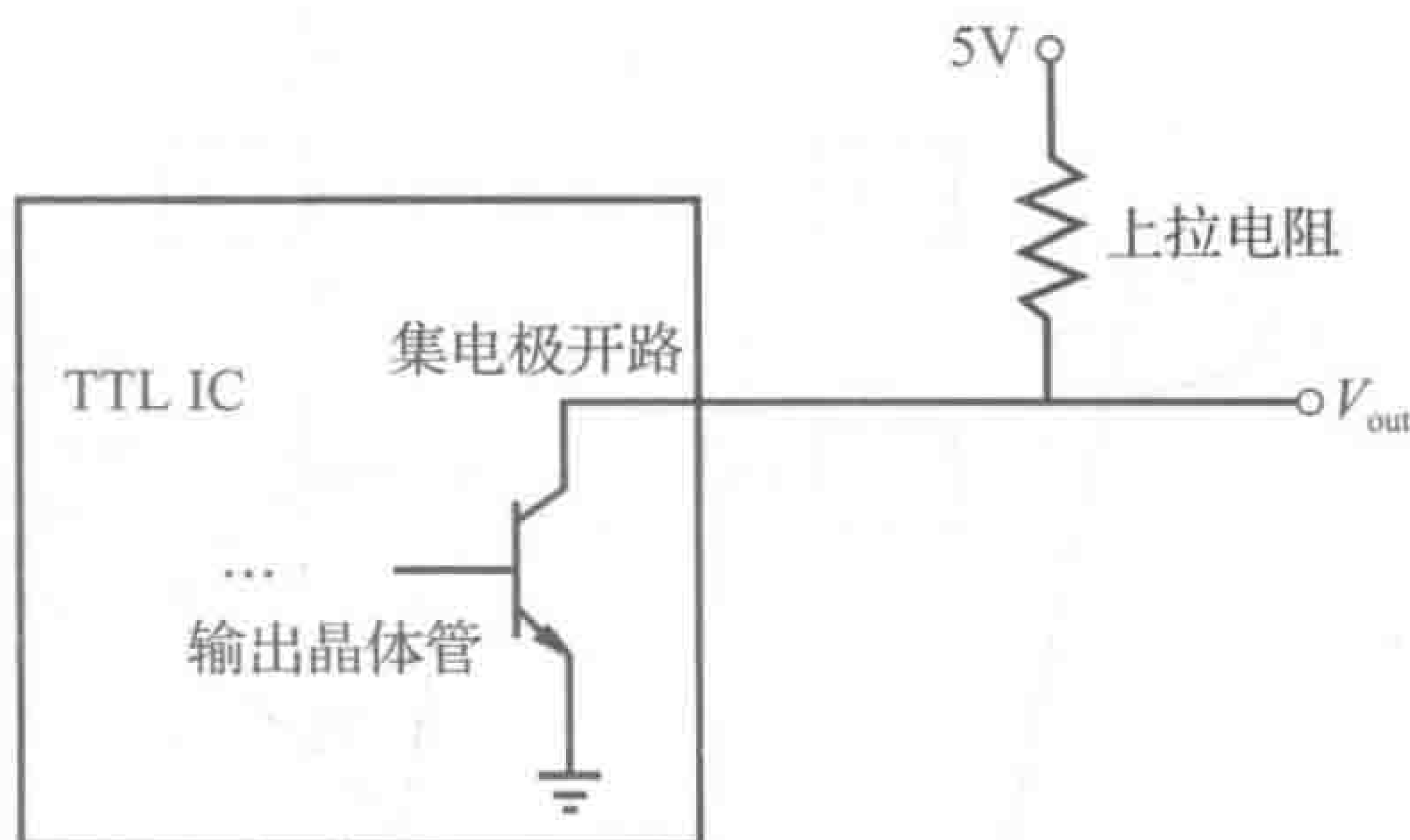


图6-29 外接上拉电阻的集电极开路输出电路

一些CMOS器件未采用图6-23和图6-27所示的完整的CMOS输出级，而是采用了与TTL器件集电极开路输出类似的**开漏**输出结构。

课堂讨论项目6.12 驱动LED

有3种不同的方式可通过TTL器件来驱动LED，这取决于输出类型是图腾柱式还是集电极开路式以及器件通过LED是吸入还是输出电流。绘制出3种可能的输出电路。这3种电路中哪种属于正向逻辑（即当输出为高时，LED打开；当输出为低时，LED关闭）？说明这3种电路是源电流还是灌电流。哪一种电路能够使得LED灯最亮？为什么？

6.11.3 TTL和CMOS器件的接口

当需要连接来自相同或不同类别的器件时可能会出现一些状况。本节考虑将TTL器件连接到其他TTL和CMOS器件，以及将CMOS器件连接到其他CMOS和TTL器件所遇到的问题。当设计数字系统时，建议只使用一种类型的器件（TTL或CMOS），但有时你可能需要与不同类型的器件进行连接。

图6-30显示了如何将TTL器件与数字IC的不同组合相连。TTL输出为低时灌入电流，为高时输出电流。输出为低时的灌电流（I_{OL}）是连接多个TTL输入时的限制因素。TTL输出可以驱动10个标准的TTL输入或高达40个低功耗肖特基型（LS）TTL输入。由于CMOS具有绝缘的门输入，所以TTL输出很容易与CMOS进行接口，并且稳态时没有电流消耗。将TTL输出与CMOS输入相连时，唯一需要考虑的是确保两者之间的电压匹配。回顾图6-22，TTL低输出与CMOS低输入完美匹配。然而TTL的高电平输出可能低至2.7V，这并不足以匹配CMOS所需的3.5V输入。如图6-30所示，对TTL输出外接上拉电阻可以将其输出电压提高至3.5V以上，从而满足CMOS输入的需求。上拉电阻必须足够大（如1kΩ）但不应超出TTL器件灌电流（I_{OL}）的最低限制值。如果考虑功耗，上拉电阻可以更大。

图6-31显示了如何将CMOS与数字IC的不同组合相连。由于CMOS器件的输入端为绝缘栅极，所以CMOS器件输出处于稳定状态时既不灌入电流也不输出电流，因此，CMOS输出可以与多个CMOS输入相连接。如果CMOS器件由5V电源电压（V_{DD}）供电并用于驱动TTL器件，则CMOS输出为高是没有问题的，因为CMOS器件具有足够的源电流来驱动TTL输入。然而，当CMOS低输出时灌入电流只能驱动一个LS TTL输入。

CMOS 4049 缓冲器可以用来提供足够的扇出能力以驱动两个标准的 TTL 输入或大约 10 个 LS TTL 输入。

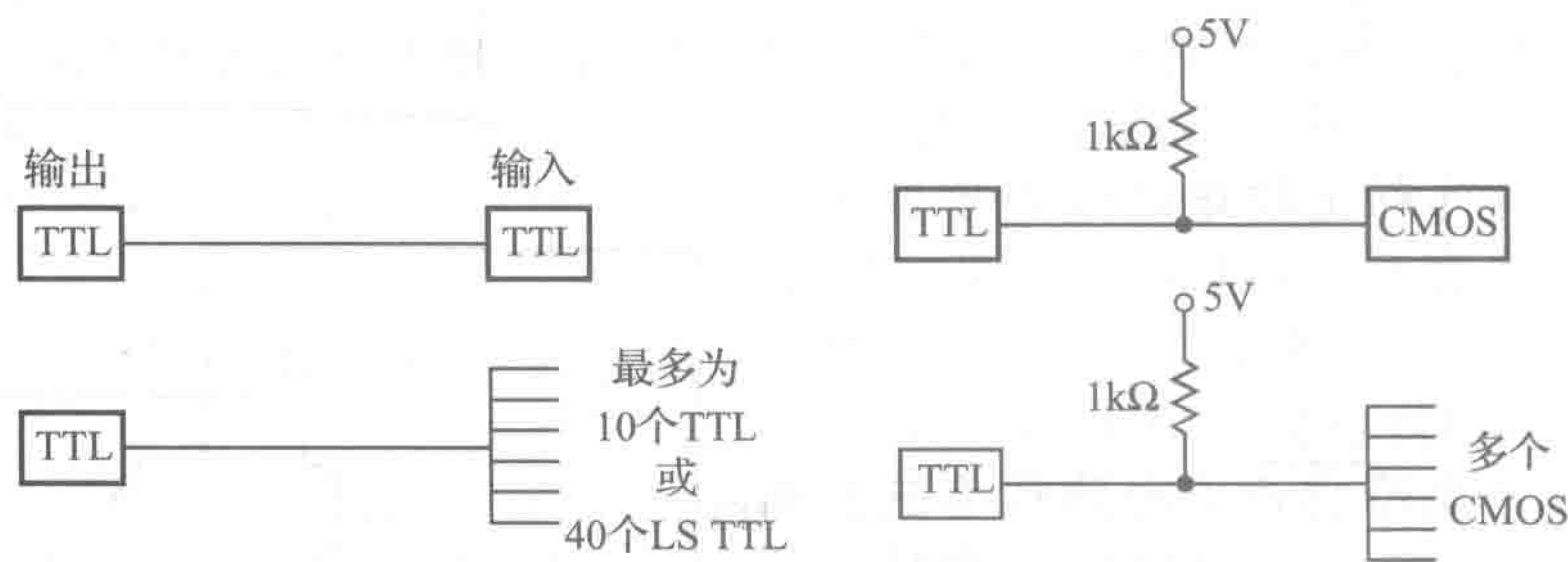


图 6-30 TTL 与数字器件的接口

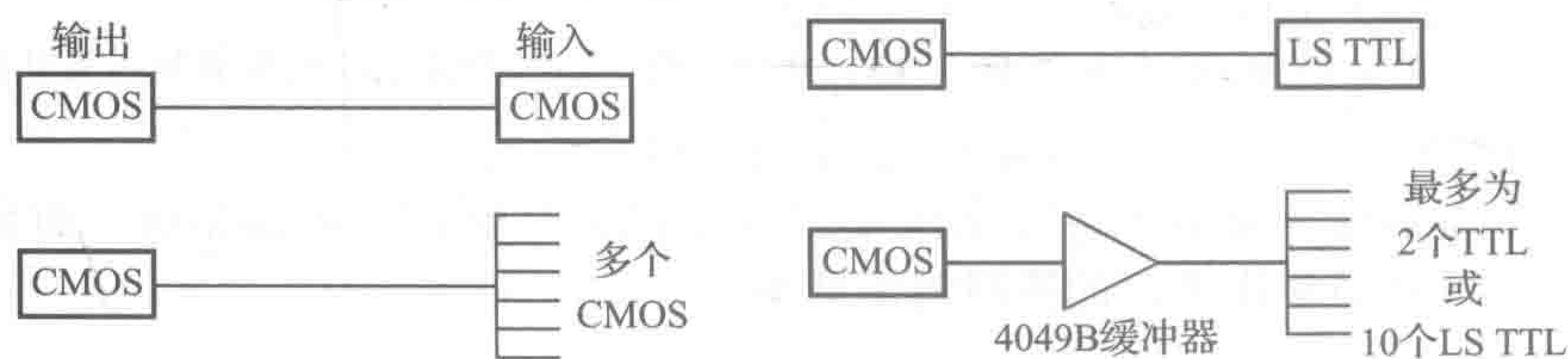


图 6-31 CMOS 与数字设备间的连接

7.8 节提供了一些如何将 TTL 和 CMOS 的输入和输出连接到各种器件上的额外信息，虽然这些信息是针对 PIC 单片机的，但也适用于任何 TTL 和 CMOS 器件，如与传感器、开关、键盘、施密特触发器、功率晶体管和继电器的接口。

总之，当使用同一逻辑系列的集成电路时，只要其 TTL 扇出数小于 10(CMOS 可以更高)，就无须考虑接口电平和电流的驱动能力。CMOS 通常是更好的选择，因为除非其输出状态发生变化，否则无电流消耗，并且其输出电压值可低至接近地电平或高至接近电源电压值。然而，在高频时，CMOS 器件的功耗几乎与等效的 TTL 电路功耗相同。

6.12 专用数字集成电路

本节介绍一些可用于数字设计的专用集成电路。包括十进制计数器、施密特触发器、555 定时器。

6.12.1 十进制计数器

6.10.3 节给出了一个触发器电路用于实现二进制计数。另一种常见的计数器称为**十进制计数器**，它可以用 7490 IC(见习题 6.49)来实现。这是一个下降沿触发型计数器，其输出为 4 位 BCD 码，这使得其可用于十进制计数。表 6-10 给出了计数值从 0 增至 9 时的 4 位输出序列。图 6-32 所示为计数器输入和 4 位十进制计数器输出的时序图。注意，计数值到 1001(9_{10})后将返回到 0000(0_{10})。

表 6-10 7490 十进制计数器 BCD 编码

十进制数	BCD 输出			
	D	*C*	*B*	*A*
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1

（续）

十进制数	BCD 输出			
	D	C	B	A
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
0	0	0	0	0

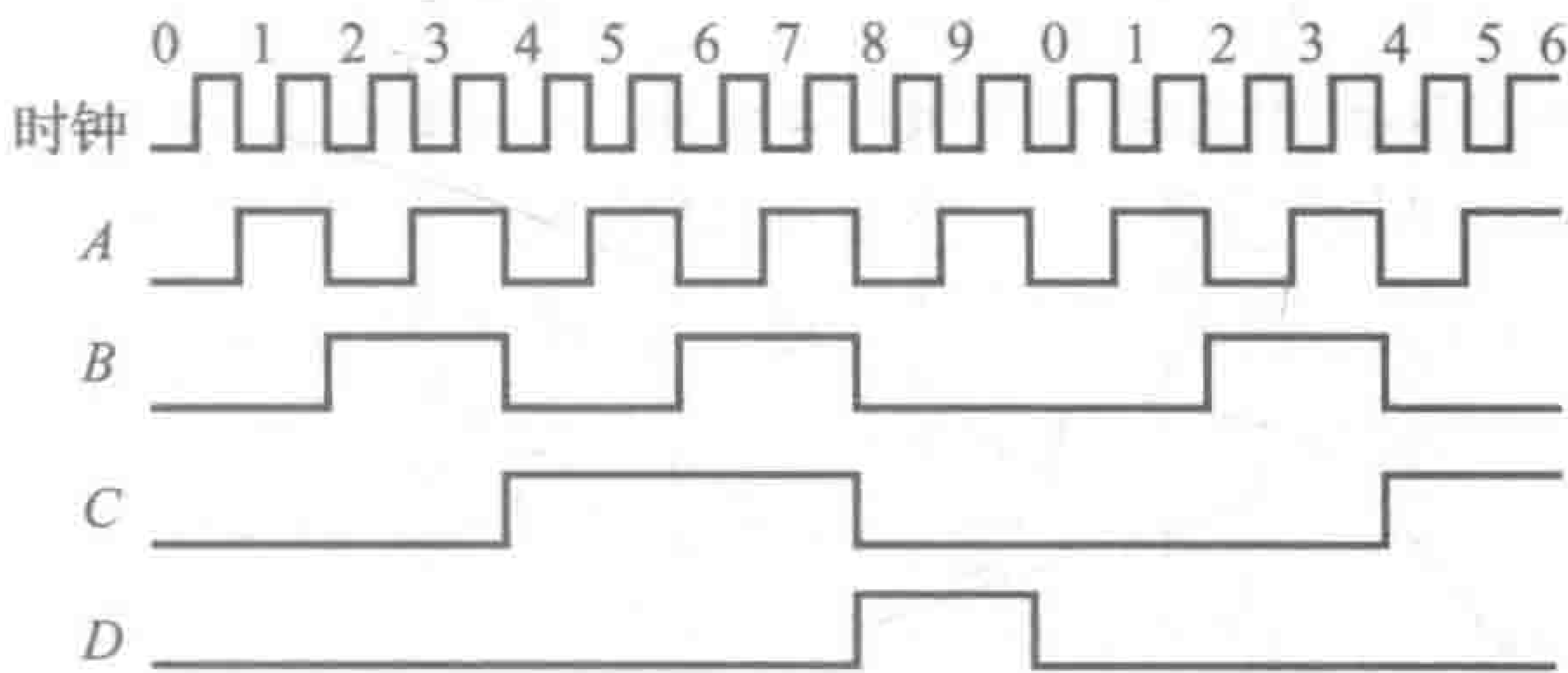


图 6-32 十进制计数器的时序图

如图 6-33 所示，BCD 计数器可以级联以实现 10 的幂次计数。前一个计数器的输出 D 可以作为下一个 7490 的时钟输入，从而将两者级联起来扩展计数范围至 0～99。进一步级联可以计数 10 的更高次幂。7490 是一个通用集成电路，可以通过多种有用的方法进行连接，包括二进制计数器、除以 2 计数器、除以 4 计数器等。网络链接 6.6 指向 7490 的完整数据手册，它提供了 7490 所支持的各种连接结构的说明。

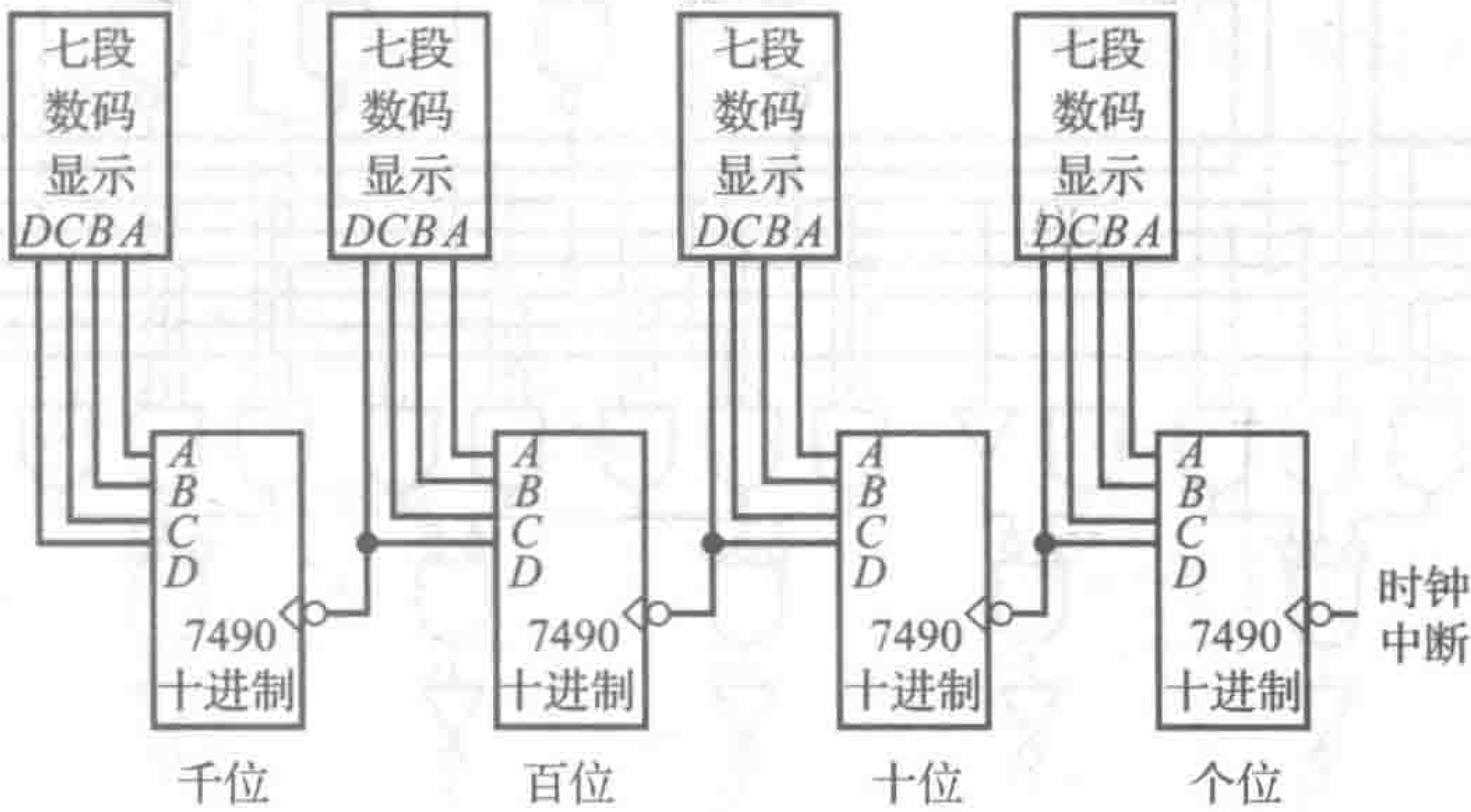


图 6-33 级联的十进制计数器

一种方便查看 BCD 输出的器件是由 7447 BCD 解码器驱动的七段数码显示器（见图 6-34）。图 6-35 显示了两位七段数码显示屏，可以显示从 0～99 的数字。同时，图中同时给出了 7447 显示解码器集成电路的照片。7447 将 4 位 BCD 输入转换成 7 位编码以正确驱动七段数码管显示对应的数字。7447BCD 输入至输出（负逻辑七段数码管编码）之间的关系如表 6-11 所示。通过绘制合适的段显示数字可以对表中的每一行数据进行验证。图 6-36 给出了 7447 内部的组合逻辑电路设计。网络链接 6.7 指向完整的 7447 数据手册。

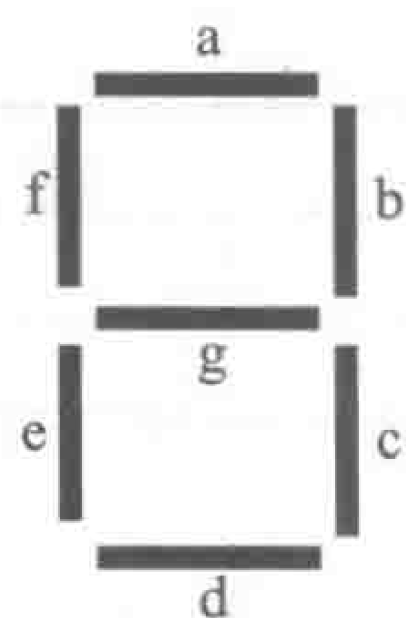


图 6-34　七段数码显示器

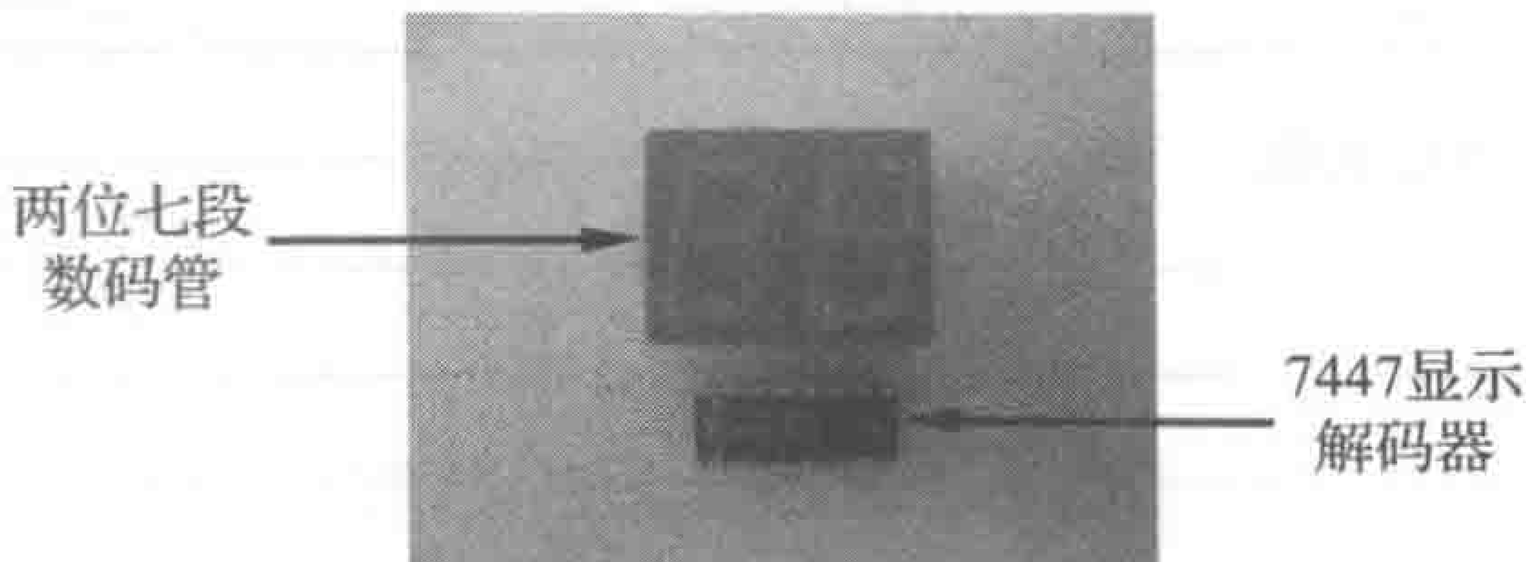


图 6-35　两位七段数码显示器与 7447 显示解码器

表 6-11　7447 BCD 到七段解码

十进制	输入				输出						
	D	C	B	A	$\overline{a}$	$\overline{b}$	$\overline{c}$	$\overline{d}$	$\overline{e}$	$\overline{f}$	$\overline{g}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

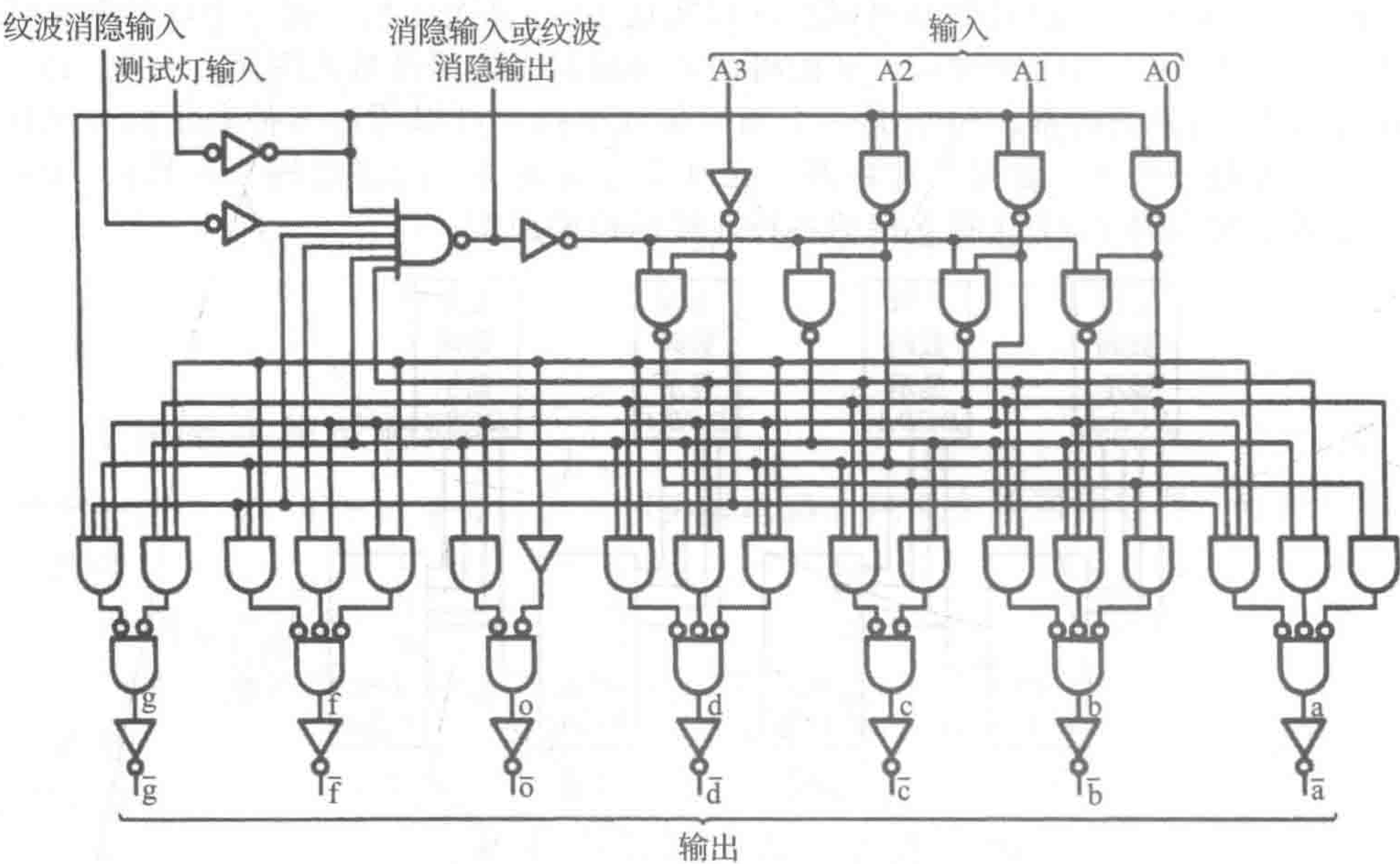


图 6-36　7447 内部设计(资料由美国国家半导体公司提供)

如果 7447 解码器正确连接到一个七段数码显示器上，则计数器的输出可以通过数字的形式显示出来。注意，解码器驱动电路并没有提供电流来实际驱动 LED 段，相反，它以图 6-37 所示的方式灌入电流。7447 的输出是集电极开路的。电阻和 LED 段与 7447 相应的输出互连形成了完整的回路，因此，当 7447 输出低(0)时，LED 打开(即发光)，允许电流流向地。330Ω 的电

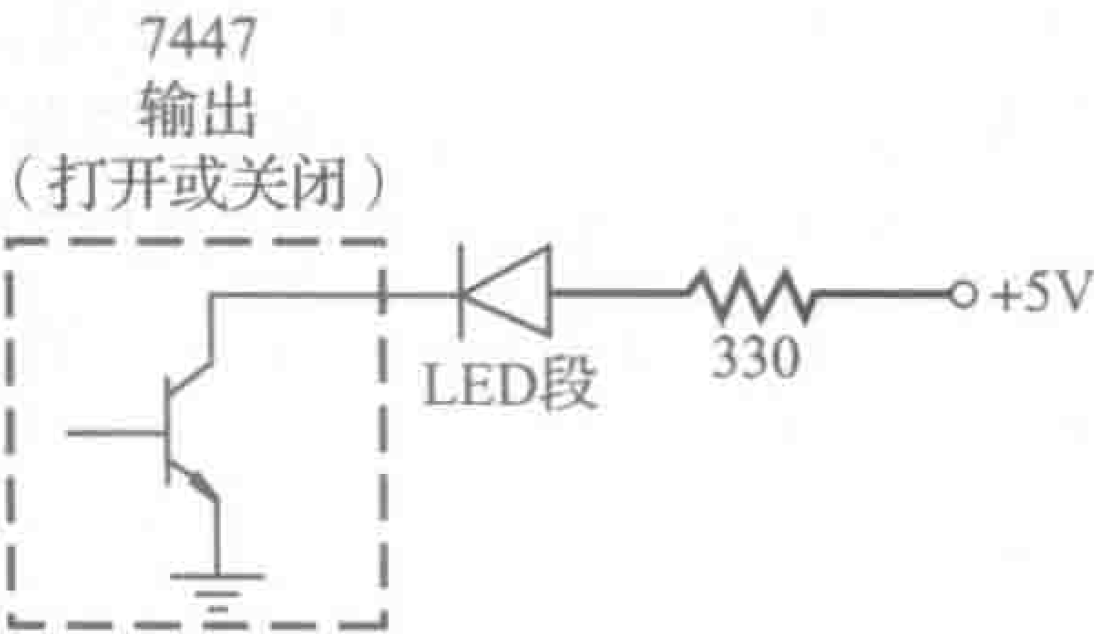


图 6-37　7447 输出电路

阻与LED段相串联用于限制进入解码器的电流，并防止过流损坏数码管。

实验练习8介绍了如何构建一个带有LED数字显示的计数器电路。视频演示6.4展示了电路的最终功能。

课堂讨论项目6.13　可逆计数器

使用TTL逻辑手册或网络搜索来查找一个称为**可逆计数器**的数字集成电路。注意，器件可以用作为二进制、十六进制或十进制计数器。讨论可逆计数的目的，并给出器件使用不同的连接配置进行计数的例子。

6.12.2 施密特触发器

在某些应用中，数字脉冲可能没有锐利的边沿，相反，图6-38所示的信号可能在一个有限的时间段内从0V逐步上升到5V或者信号可能是含有噪声(跳变)。施密特触发器是将此类信号转变为具有锐利边沿脉冲信号的器件，它通过图6-38所示的具有滞回的阈值来实现上述功能。当输入超过高阈值时，输出变高并保持在高状态直到输入低于低阈值。低和高阈值之间的滞回效应导致输出有不同的边沿。6个施密特触发器通常封装在一个集成电路中(如7414的六施密特触发反相器)。

6.10.1节给出了一个可用于防止SPDT(有3个引线)开关抖动的电路。这个电路不能用于SPST开关的防抖，因为它只有两根引线，常见的按钮开关通常是该类型的(更多信息参见9.2.1节)。图6-39给出了一个施密特触发器RC电路，可用于防止SPST开关的抖动。7414输出端的取反小圆圈表明7414是一个施密特触发反相器，即输出与输入反相。如图6-39所示，当打开开关时，电容器完全充电至5V，7414输出为低。开关闭合时，电容对地短路，7414输出变高。在开关第一次闭合接触时，电容电压可能放电至7414的低阈值以下(这依赖于电容值的大小)，如果没有，电容器将随着开关的抖动最终完全放电直至稳定的开关接触得以建立。当开关打开时，电容再一次开始充电，开关打开时任何的开关抖动只会短时间中断充电，当电容充电值高于7414高阈值时，输出再一次变低。结果是一个干净的、无抖动的输出脉冲。



图6-38　施密特触发器的输入和输出

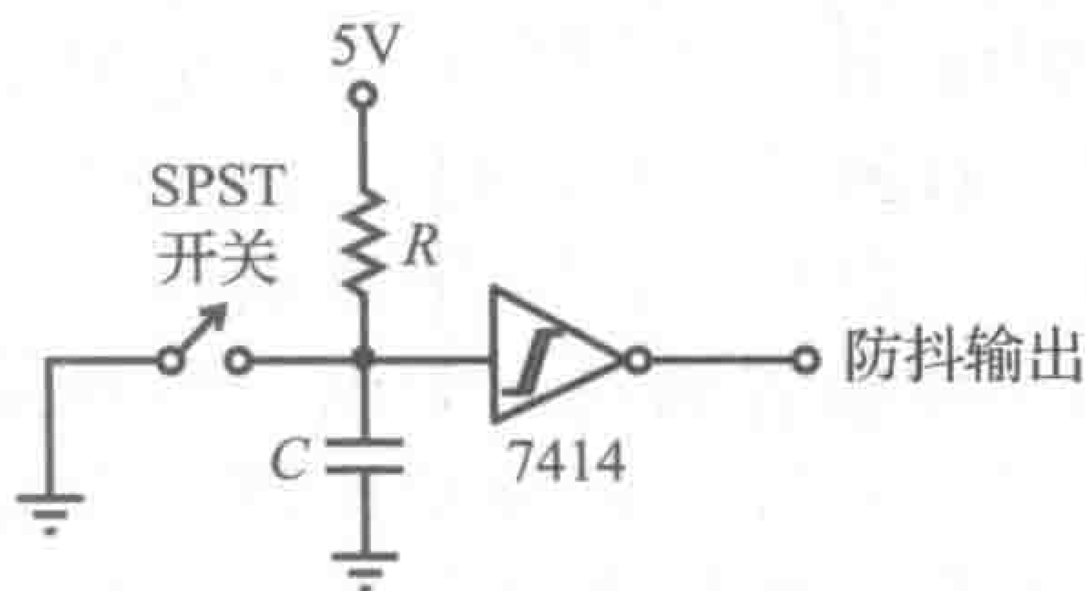


图6-39　施密特触发器SPST防抖电路

6.12.3 555定时器

555集成电路也称为“时间机器”，因为它可以完成各种各样的定时任务。它是数字电路和模拟电路的组合。如图6-40所示，在555定时器的框图中给出了其引脚名称和编号。图6-41所示为555定时器的两种封装和引脚配置。制造商通常将555集成电路(如TI的NE555)安排在线性电路数据手册中的特殊功能集成电路部分中。网络链接6.8指向555计时器的完整数据手册。555的应用包括无抖动开关、级联定时器、分频器、压控振荡器、脉冲产生器、LED闪光及许多其他有用的电路。

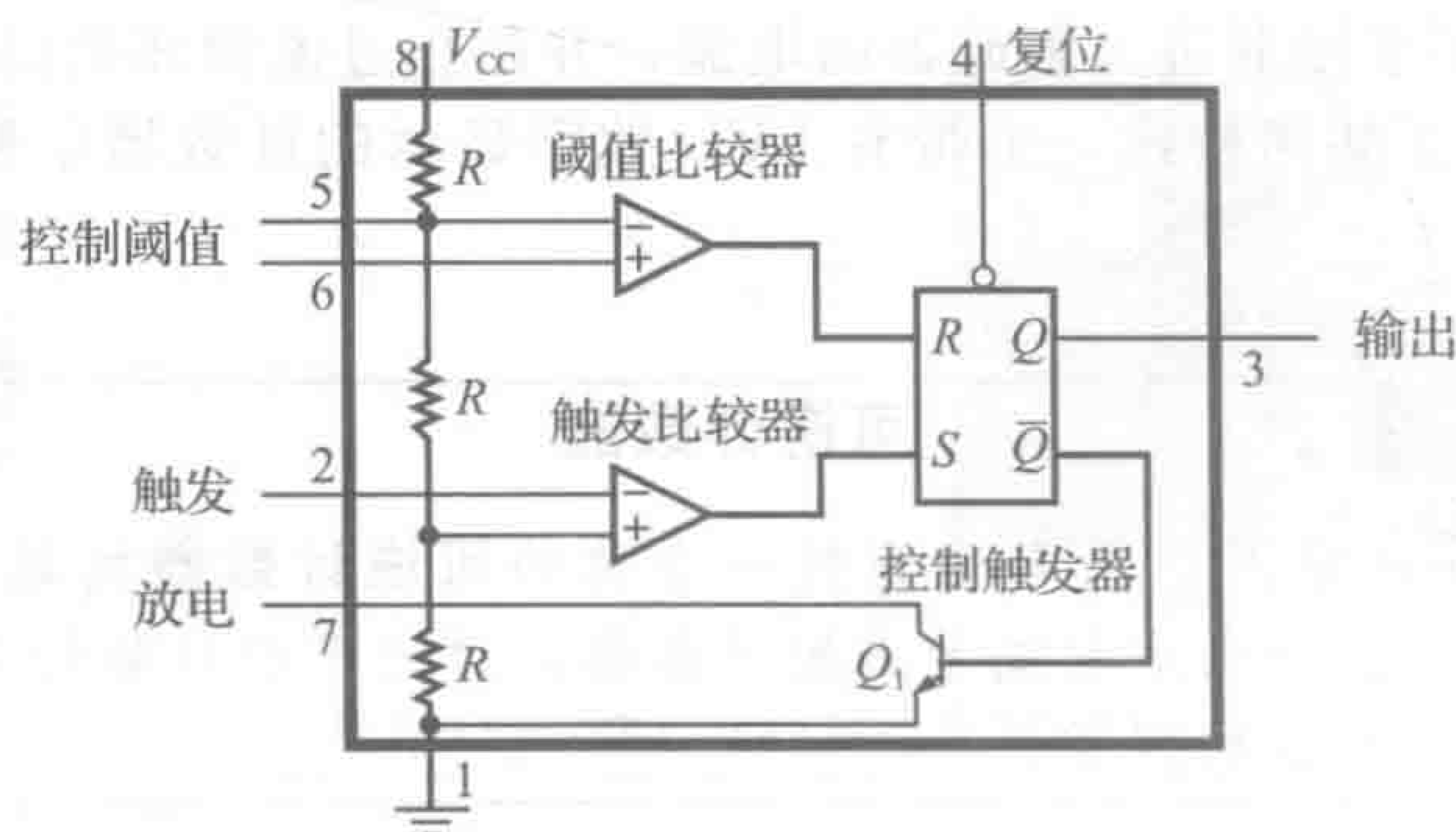


图 6-40　555 集成电路的框图

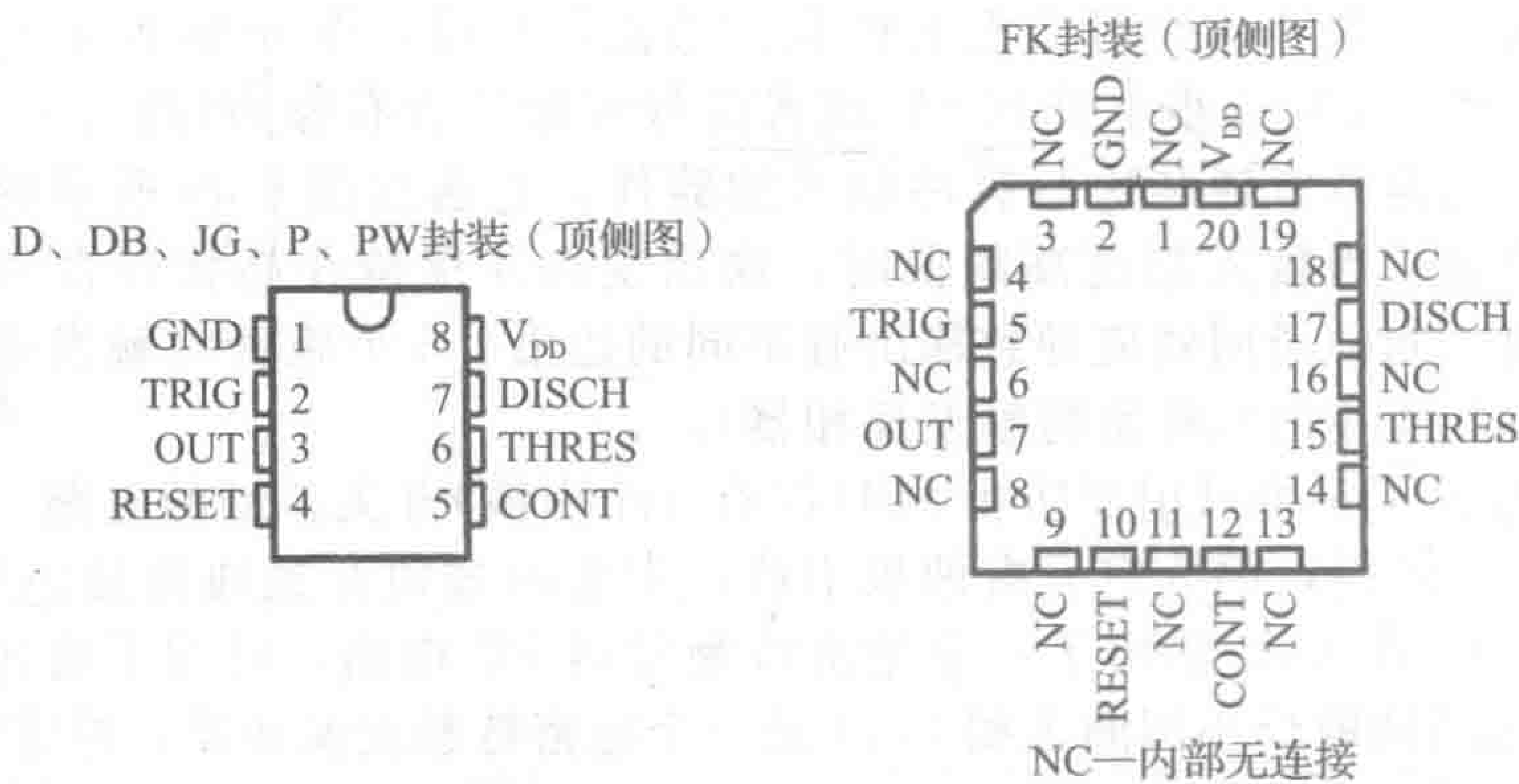


图 6-41　555 引脚图(由德州仪器公司提供)

555 集成电路可以通过连接外部电容和电阻很容易地构建图 6-42 所示的**单稳多谐振荡器电路**。当电路收到触发信号后会产生一个期望宽度的单个脉冲，因此也称为**单稳输出**。电阻与电容组合后的时间常数决定了脉冲的宽度。在图 6-43中，其工作顺序如下：电路上电或复位后被激活，输出初始为低($Q=0$)，晶体管 Q_1 饱和(打开)使得电容与地短接，两个比较器的输出为低。当触发脉冲低于$(1/3)V_{CC}$时，触发比较器变高并置位触发器，此时输出为高($Q=1$)，晶体管 Q_1 关断，电容以时间常数 $\tau=R_aC$ 开始充电。时间常数是电容电压达到63.2%的完全充电电压值 V_{CC} 时所需的时间(见 4.9 节)。当电容电压达到$(2/3)V_{CC}$时，阈值比较器输出复位触发器($Q=0$)，并再次对电容器放电。如果输出为高时再次接收到触发脉冲则对输出结果无影响。输出脉冲的宽度大约为（见习题 6.52)

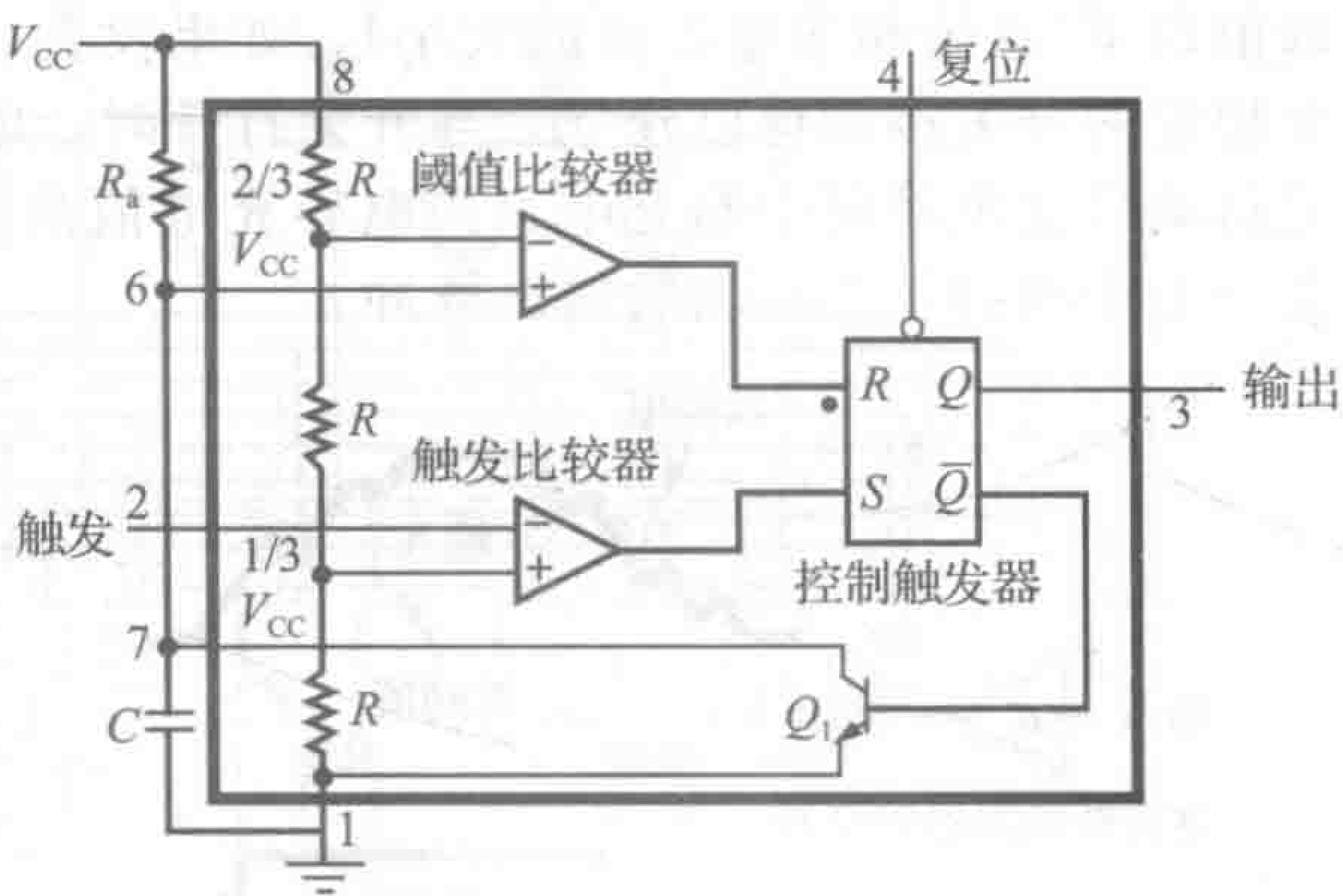


图 6-42　单稳态多谐振荡器

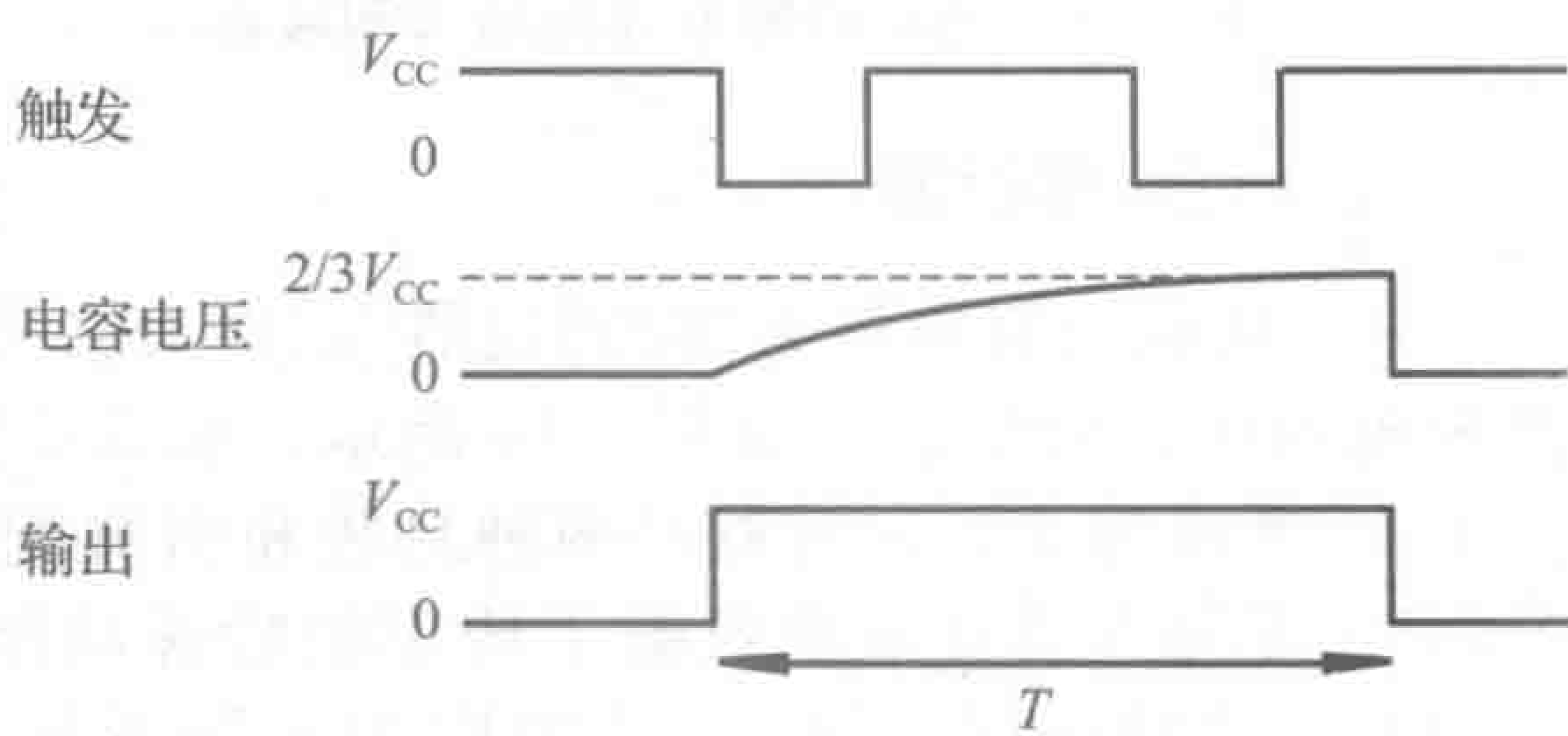


图 6-43　单稳触发时序

$$\Delta T \approx 1.1R_aC \tag{6-36}$$

作为555单稳电路的替代，TTL逻辑系列中也包括了单稳触发器件，如74121和74123。它们同样也需要一个外部电阻和电容来控制脉冲宽度。

另一个可以采用555定时器组成的重要电路是**不稳定多谐振荡器**，也称为方波发生器或振荡器。这个电路的原理图如图6-44所示。电路通电后，电容C通过串联电阻R_1和R_2以时间常数$(R_1+R_2)C$进行充电。当C上的电压达到$(2/3)V_{CC}$电压时，触发器复位，打开放电晶体管，使得电容C通过电阻R_2以时间常数R_2C放电。当C上的电压降低到$(1/3)V_{CC}$时，触发器置位，开始周期性地重复上述过程。结果导致输出一个重复且规则的脉冲信号。

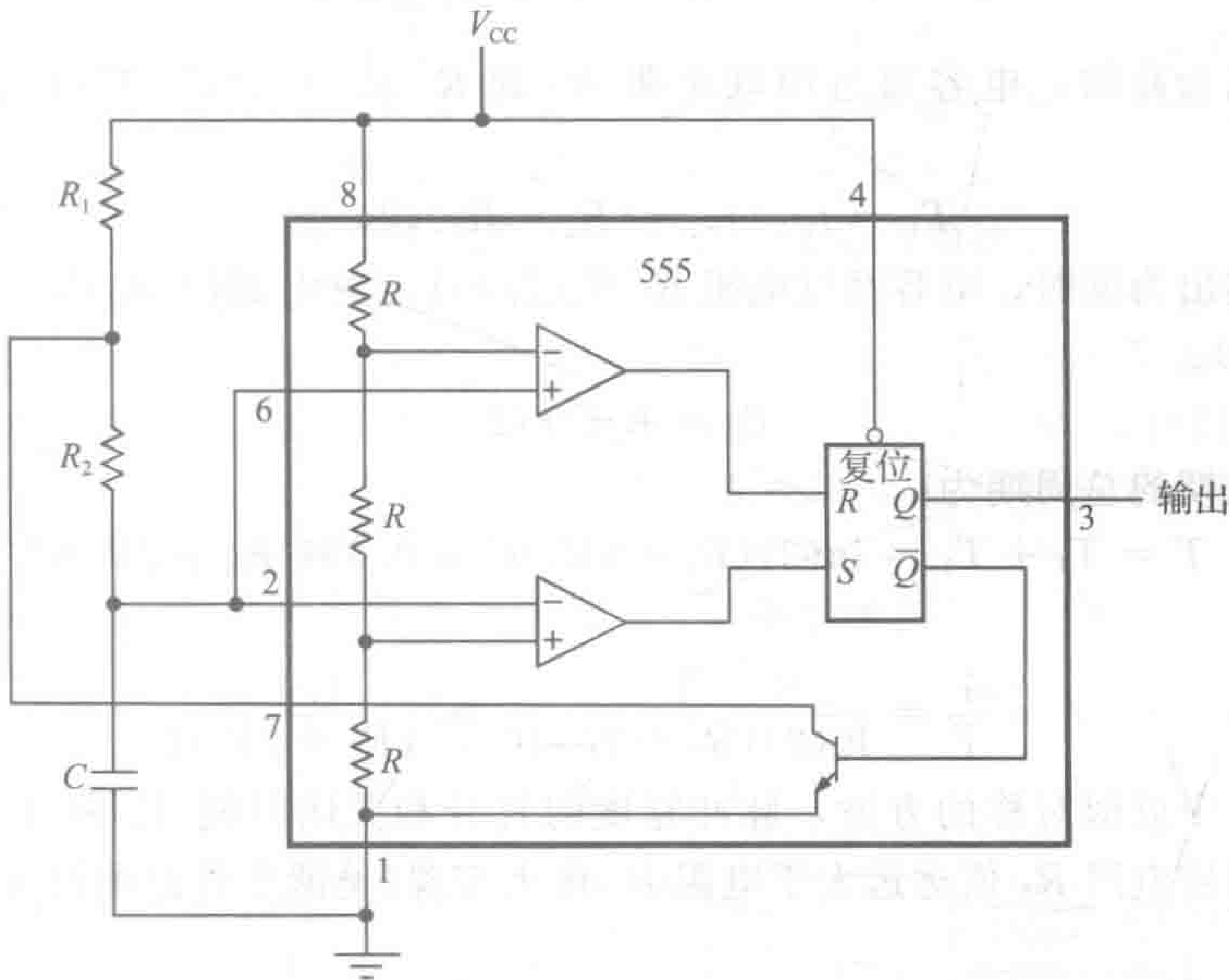


图6-44 不稳定多谐振荡器

图6-45显示了当不稳定的多谐振荡器周期性重复时，电容器电压(V_C)和输出信号(Q)是如何随着时间而变化的。从4.9节可知，RC电路是一个具有时间常数$\tau=RC$的一阶系统，其充电可视为对阶跃输入电压V_{CC}的响应：

$$V_C(t)=V_{CC}(1-e^{-\frac{t}{RC}}) \tag{6-37}$$

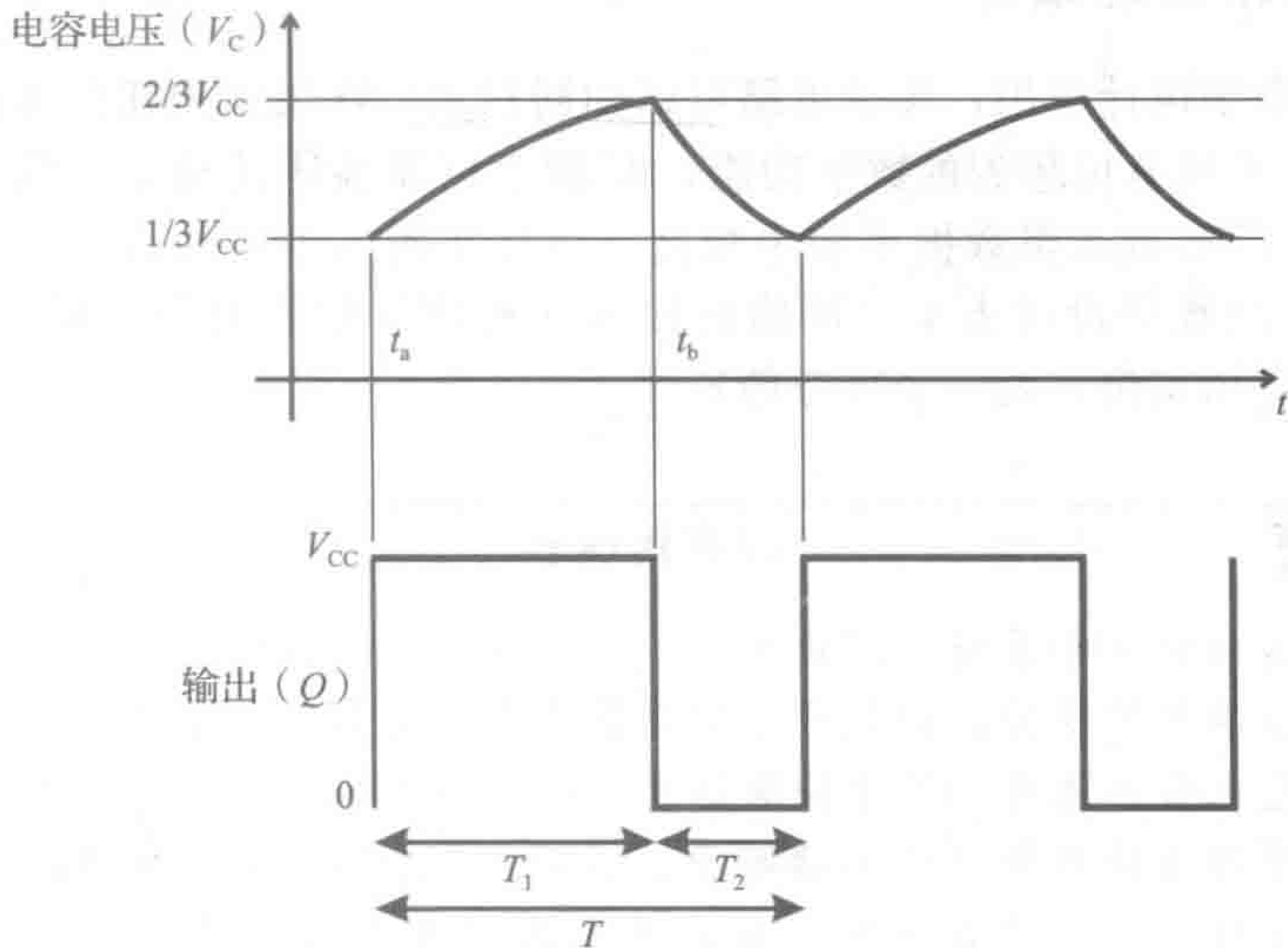


图6-45 不稳定的多谐振荡器的电容电压和输出信号

电容通过串联电阻 R_1 和 R_2 从 0V 充电到$(2/3)V_{CC}$的时间可以由下式求得：

$$\frac{2}{3}V_{CC} = V_{CC}[1 - e^{\frac{t_b}{(R_1+R_2)C}}] \tag{6-38}$$

解上述方程，可得：

$$t_b = -(R_1 + R_2)C\ln\left(\frac{1}{3}\right) \tag{6-39}$$

同样，可求得从 0V 充电到$(1/3)V_{CC}$的时间为：

$$t_a = -(R_1 + R_2)C\ln\left(\frac{2}{3}\right) \tag{6-40}$$

因此，输出为高时，电容通过串联电阻 R_1 和 R_2 从$(1/3)V_{CC}$充电到$(2/3)V_{CC}$的时间为：

$$T_1 = t_b - t_a = (R_1 + R_2)C\ln(2) \tag{6-41}$$

类似地，输出为低时，电容经过电阻 R_2 从$(2/3)V_{CC}$放电到$(1/3)V_{CC}$的时间可以表示为(见习题 6.54)：

$$T_2 = R_2C\ln(2) \tag{6-42}$$

因此脉冲周期的总周期为：

$$T = T_1 + T_2 = \ln(2)(R_1 + 2R_2)C \approx 0.693(R_1 + 2R_2)C \tag{6-43}$$

频率为：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln(2)(R_1 + 2R_2)C} \approx \frac{1.443}{(R_1 + 2R_2)C} \tag{6-44}$$

为了获得一个近似对称的方波，脉冲宽度的打开和关闭时间 T_1 和 T_2 需要尽可能接近。这可以通过使电阻 R_2 值远远大于电阻 R_1 值来实现(见课堂讨论项目 6.14)。

课堂讨论项目 6.14　不稳定的方波发生器

如何通过图 6-44 所示的电路产生一个完全对称的方波？这种方法有潜在的问题吗？此外，如果电路通电前电容器已经部分充电，则对电路的输出有何影响？

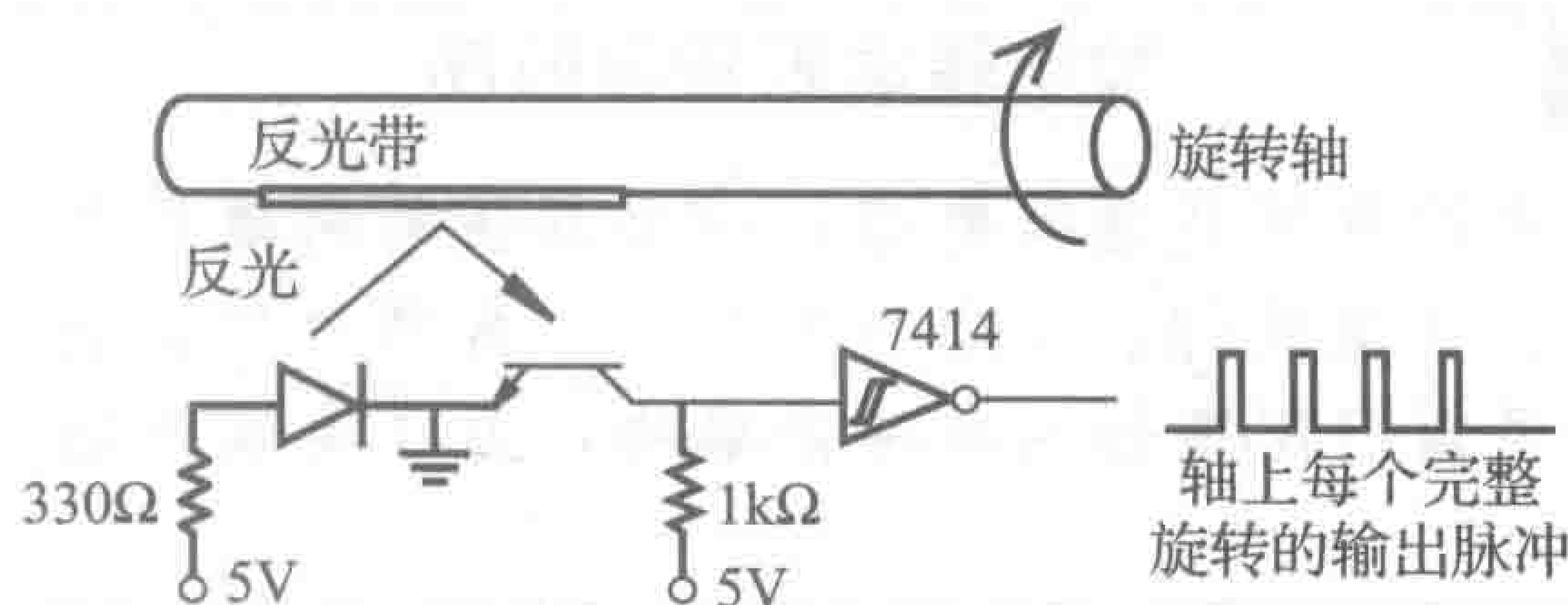
6.13 集成电路系统设计

对于大多数数字设计应用，集成电路可以如同积木一样用来构建所需的功能。市场上无数的 IC 提供几乎所有可想到的数字功能。IC 列表以及描述其功能的数据手册可以在线查找或在制造商 TTL 或逻辑数据手册中找到。设计实例 6.1 中的数字转速表介绍了一个采用几种商用 IC 的数字设计方案。网络链接 6.9 提供了数字电子基础知识、逻辑器件、电路分析设计和应用实例，是一个很好的资源。

设计实例 6.1　数字转速表

此例的目标是设计一个系统来测量和显示轴的转速。测量转速的一个简单方法是在给定的时间内计算轴旋转的次数，由此产生的计数将直接与轴的速度成正比。

许多不同类型的传感器可以用于检测轴的旋转。接近传感器是一个典型的例子，它通过磁、光或机械原理来检测轴上的一些特征。我们可以使用 LED 光敏晶体管对作为光学传感器，并在轴上放置一小片反光带。每次反光带经过光电对时，7414 施密特触发反相器会输出单个脉冲给计数电路。下图给出了传感器及其信号调理电路。

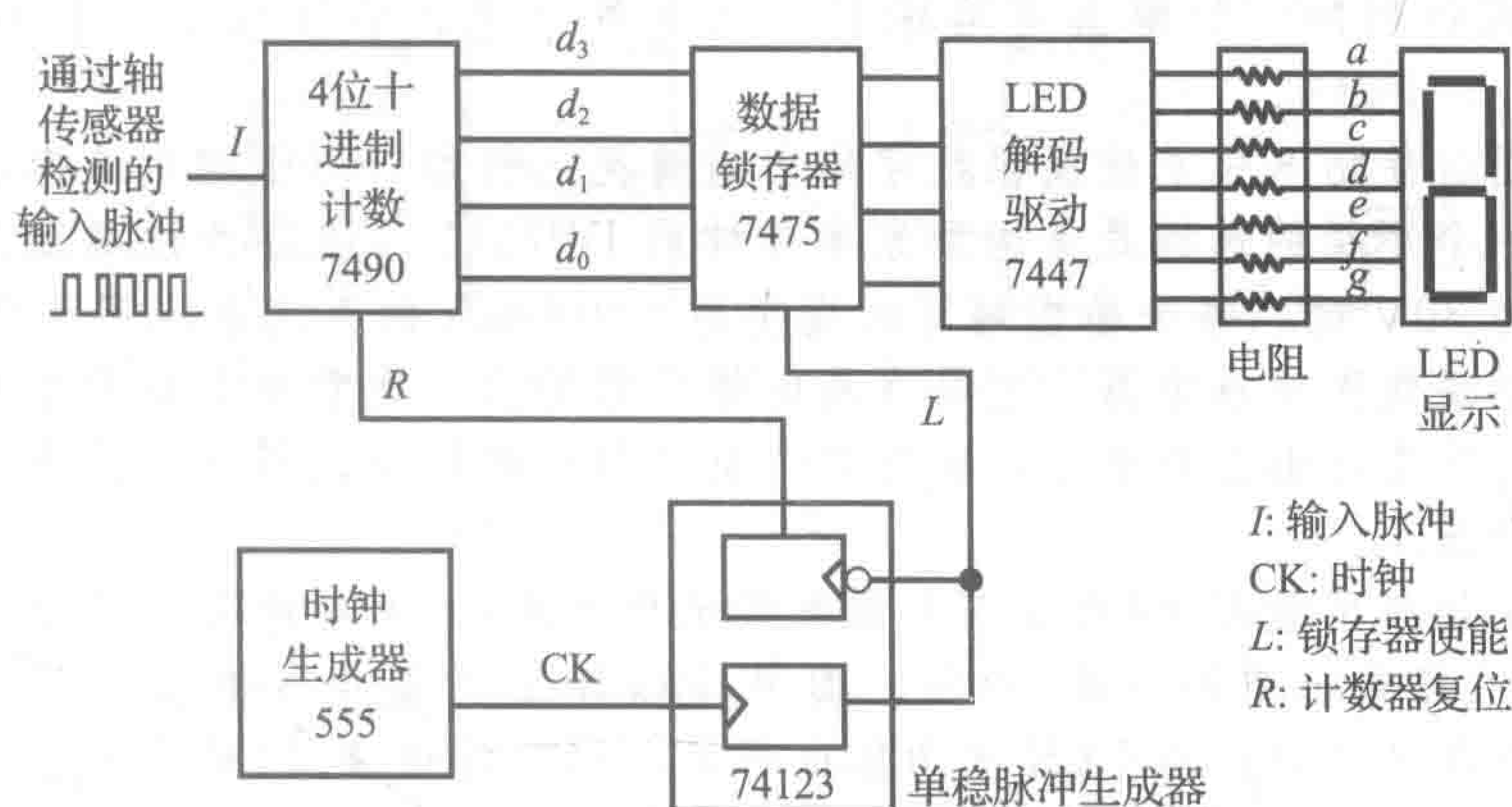


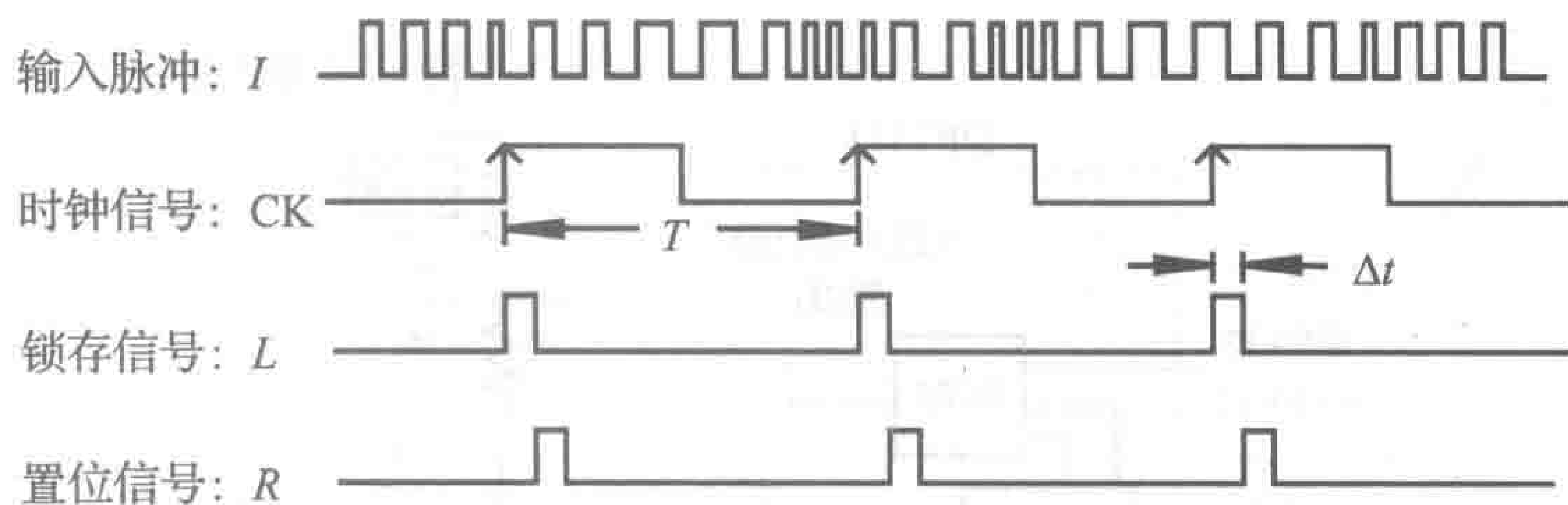
现在需要一个电路来计算并显示在给定的时间间隔 T 内的脉冲数。下图给出了电路所有必需的元件。7490 十进制计数器对脉冲计数，到达周期 T 后，在信号 R 的下降沿复位计数值。周期 T 由 555 振荡器电路中的电阻电容组合设定。如果在计数周期 T 内计数值可能超过 9，则需要级联额外的 7490 以提供完整的计数。计数器复位之前，通过一个简短的脉冲信号 L 将计数值存储于 7475 数据锁存器中。当计数器开始新的计数周期后锁存器应维持上一次的计数值并用于显示，这是必需的。一个 74123 单稳触发器由时钟信号的上升沿触发以产生长度为 Δt 的锁存脉冲 L。注意，锁存和复位脉冲宽度必须充分小($\Delta t \ll T$)以保证计数精度(见课堂讨论项目 6.15)。锁存脉冲 L 的后沿触发第二个下降沿触发的单稳触发器，产生一个延时的计数器复位脉冲 R。7447LED 解码和驱动器将 BCD 计数值转换为七段数码管所需的 7 个信号，以驱动其显示。这个显示器显示了在计数周期 T 内有许多脉冲。

轴每分钟的转速与脉冲计数值之间的关系可以表示为：

$$转速 = \frac{脉冲数 / \mathrm{ppr}}{T} 60$$

式中，ppr 为传感器每转产生的脉冲数量(如单反光带为 1)。





课堂讨论项目 6.15　　数字转速表的精度

设计实例 6.1 中，Δt 的选择对数字转速表的精度有何影响？

课堂讨论项目 6.16 数字转速表锁存时序

对于设计实例 6.1 中的数字转速表电路，一个潜在的问题是数据锁存可能恰好发生在计数器响应输入脉冲对计数值执行加 1 操作的时刻，解释为什么会出现这个问题？该问题可以通过在锁存时加入逻辑门阻塞输入脉冲来解决，为了实现此功能，需要在原理图中添加什么样的电路？

课堂讨论项目 6.17 在数字设计中使用储能和旁路电容

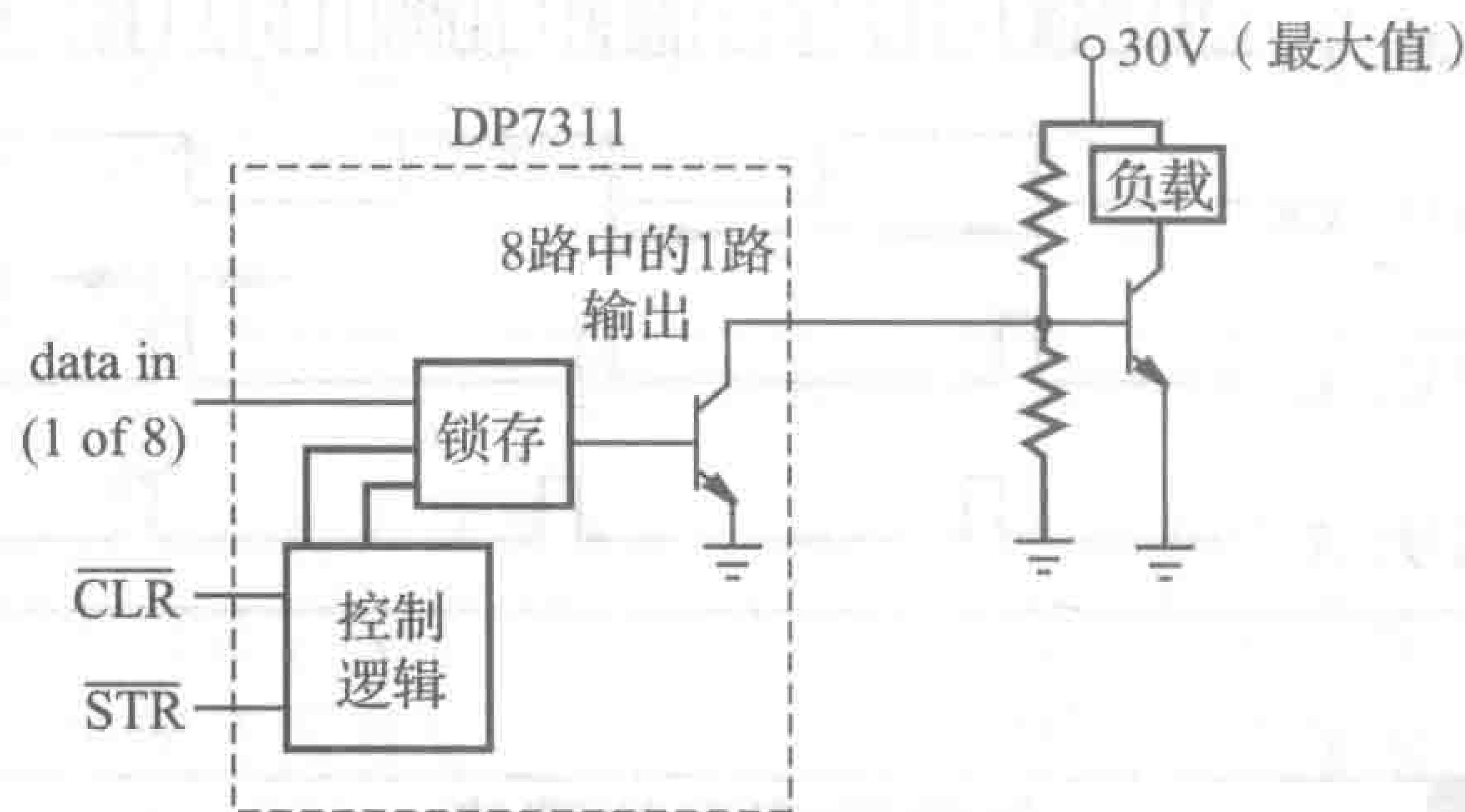
在设计数字系统时，一个标准的做法是在电源线两端接入一个或多个大容量钽电容或电解电容(如 100μF)用于**储能电容**，并在电源 V_{CC} 和地线间加入小容量的瓷片**旁路电容**或**去耦电容**(如 0.1μF)用于为每个 IC 供电。为什么？

设计实例 6.2 使用专用 IC 对负载电源进行数字控制

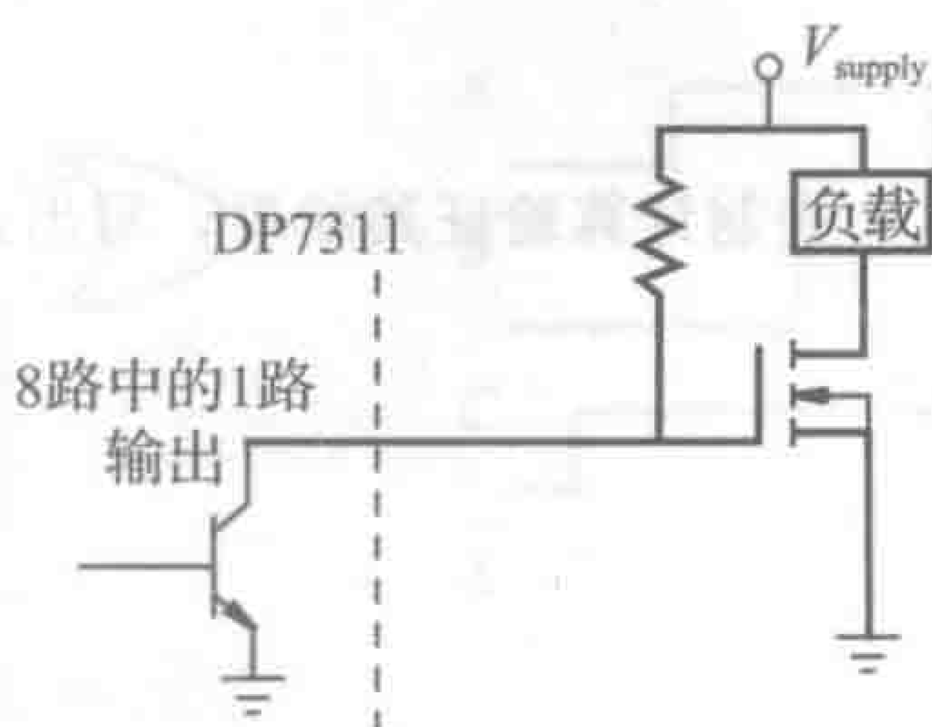
在设计实例 3.4 中，介绍了通过分立元器件功率驱动器驱动机电一体化系统的外围元器件。实际上，大型半导体制造商提供了许多专用集成电路，这对机电设计工程师的应用设计提供了极大的帮助。这些 IC 包括继电器驱动器、灯驱动器、电动机驱动器和电线圈驱动器。在本章，我们学习了如何设计逻辑电路来提供数字控制输出。这些输出可以连接到外围功率器件从而控制机械电源。外设的电源需求是非常多样的，因此，需要具有很强适应能力的接口 IC。专用接口 IC 提供了一些优点，这是一些设计人员使用分立元器件难以达到的，如输出短路保护、无毛刺上电、感应续流保护和负脉冲瞬态保护。

考虑可以通过使用 8 位总线提供数字输出的情况，例如，用于控制 8 个独立设备。对于外设驱动，一个不错的选择是美国国家半导体的 DP7311 八锁存外设驱动器。该器件在最大工作电压为 30V 时，每个输出端可以提供高达 100mA 的直流电流用于驱动 LED、电机、传感器、电磁线圈或继电器。它具有集电极开路输出，当它与具有大电流的外部分立驱动器连接时，需要外部上拉电阻，此时这个驱动器能够控制比其自身高得多的电流，考虑两种可能的配置。

第一种配置是典型的高端(负载在电源和集电极之间)、大电流双极型功率晶体管驱动器(图中只画出八路输出中的一路)输出。图中 data in 线为高电平有效，清零(CLR)和选通(STR)线为低电平有效。当 CLR 变为低电平时，锁存器被清零(输出关断)，当 STR 变为低电平时，data in 状态被锁存器锁存。



另一种方案是采用大电流 N 沟道 MOSFET 设计的，如下图所示。



IEEE 标准数字符号

图 6-46 给出了 IEEE 规定的用于说明数字输入和输出条件的标准符号。当绘制或阅读数字电路图时，正确识别这些标识非常重要。在一些制造商的 TTL 数据手册中也使用了这些符号。

负逻辑输入，外部为0，内部为1

负逻辑输出，外部为1，内部为0

低有效输入

低有效输出

低有效输入（信号流从右向左）

低有效输出（信号流从右向左）

信号流从右向左，若无特别说明，默认信号从左向右

双向信号流

仅在表明变化沿时，动态输入有效

上升沿 1 0 未使用 0 1

下降沿 1 0 未使用 0 1

极性指示器（双边沿） 未使用 H L H L

非逻辑连接，符号内的标号通常定义了引脚的性质

模拟输入信号（数字信号）

数字输入信号（模拟信号）

内部连接，左侧为1导致右侧为1

内部反相连接，左侧为1导致右侧为0

内部动态连接，左侧0变为1时，使得右侧产生短暂的1

内部输入（虚拟输入）

内部输出（虚拟输出）

图 6-46 IEEE 数字 IC 标准符号(资料由德州仪器公司提供)

问题和练习

6.1 在计算机中，整数有时会用 16 位表示。16 位二进制数值可以表示出的最大十进制数是多少？

6.2 将以下十进制整数转换为等效的二进制数，并写出过程。

a. 128

b. 127

6.3 将以下十进制整数转换为等效的十六进制数，并写出过程。

a. 128

b. 127

6.4 执行以下二进制算术运算并通过十进制计算验证其结果，写出过程。

a. 1101+1001

b. 1101−1001

c. 1101×1001

d. 111+111

e. 111×111

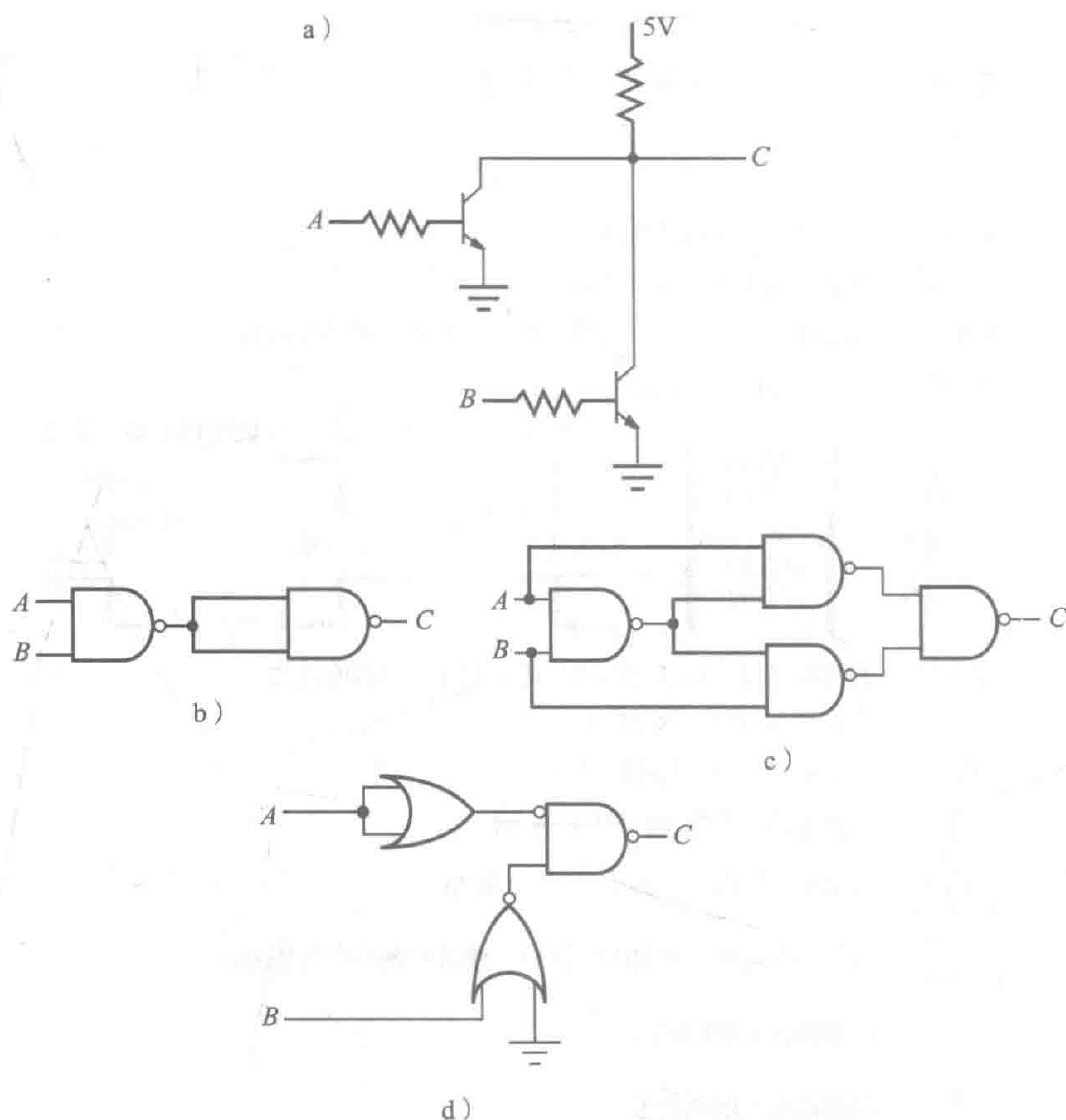
6.5 画出以下逻辑表达式所对应的逻辑电路原理图。

a. $\overline{A}+\overline{B}$

b. $\overline{A}\cdot\overline{B}$

6.6 使用一个与非门来设计一个反相器，并画出原理图。

6.7 写出下列电路简化的布尔表达式并制作真值表。假设 0=低=0V，1=高=5V。



提示：先根据晶体管的功能写出伪逻辑语句(参见 6.6.1 节和 6.6.2 节)或写出真值表。假设晶体管是理想的，其状态要么是截止要么是饱和。

6.8 绘制时序图来表达或非门的完整功能。

6.9 绘制时序图来表达异或门的完整功能。

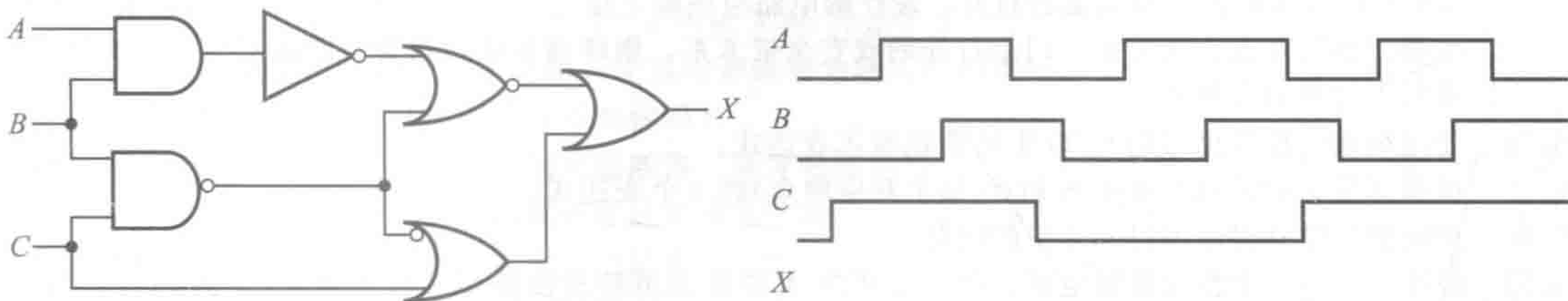
6.10 绘制时序图来显示例 6.2 中真值表的结果。

6.11 计算以下表达式的结果：

a. $\overline{1\cdot\overline{0}}+1\cdot(0+1)+\overline{\overline{0}}\cdot(1+\overline{0})$

b. $A\cdot\overline{B}+A\cdot(A+B)$

6.12 确定下列组合逻辑电路图中，X 所对应的简化布尔表达式，并完成时序图。



6.13　使用基本的布尔代数法证明式(6-20)。

6.14　使用基本的布尔代数法证明式(6-21)。

6.15　通过真值表来验证式(6-22)是正确的。

6.16　用真值表来证明式(6-23)。

6.17　证明以下布尔等式是正确的：

$$AB+AC+\overline{B}C=AB+\overline{B}C$$

6.18　证明以下布尔等式是否正确：

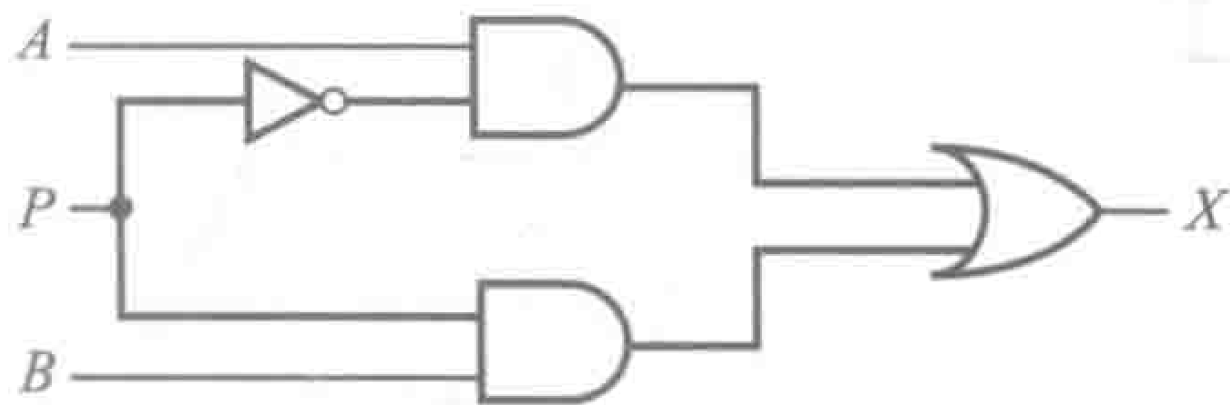
a. $(A\cdot B)+(B\cdot C)+(\overline{B}C)=(A\cdot B)+\overline{C}$

b. $A\cdot B\cdot C=\overline{A+B+C}$

c. $(A\cdot B)+(B\cdot C)+(\overline{B}\cdot C)=(A\cdot B)+C$

6.19　以两个信号(A 和 B)为例，用真值表证明德・摩根定律的有效性[见式(6-25)和式(6-26)]。

6.20　下面的电路称为**多路复用器**。构造一个真值表且写出 X 的布尔表达式，并解释为什么电路称为多路复用器？

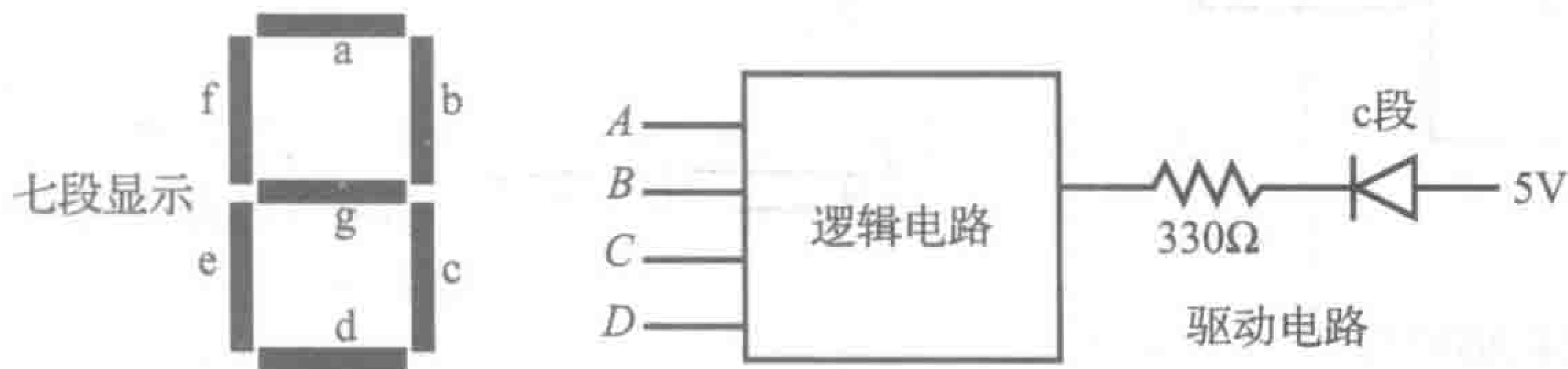


6.21　对于 6.6.3 节所示的安全系统简化布尔表达式来说，如果由于输入状态 $CD=11$ 使系统出现故障，解释在不同的情况下报警系统会有何反应？

6.22　给出例 6.3 所示的简化布尔表达式的全与门或全或门表达式，假设每个集成电路可用的与门或或门为 4 个，可用的反相器为 6 个，实现原始表达式和给出的两种替代表达式各需要多少片 IC？

6.23　给出式(6-30)的全或实现并画出电路。

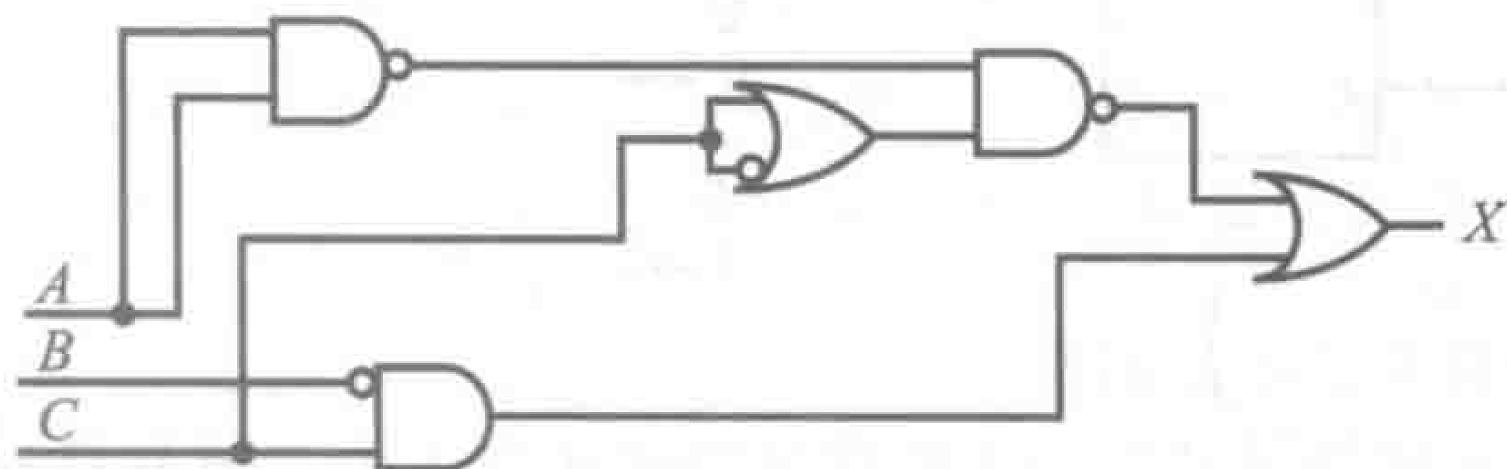
6.24　设计并画出一个逻辑电路，用于七段数码管段 c 的驱动，4 位 BCD 输入 $DCBA$ 表示从 0～9 的 10 位十进制数字。注意逻辑电路将用于下图所示的驱动电路。



6.25　对下面的布尔表达式，只使用与非门和反相器来画出逻辑电路，假设每个与非门只有两个输入。

$$X=\overline{A}\cdot B\cdot C+(A+B)\cdot\overline{C}$$

6.26　确定以下电路的简化布尔表达式，并只使用或非门和反相器来画出等效电路，假设每个或非门只有两个输入。



6.27　请为一个简单的汽车门和安全带蜂鸣器系统设计一个逻辑电路。假设传感器可以提供门和安全带状态的数字信号。门信号 A 为高意味着门是关闭的；安全带信号 B 为高则意味着安全带是系着

的；C 信号表明点火开关是否打开。设计的电路应该输出信号 X 用来打开(X 为高)或关闭一个蜂鸣器。如果在点火状态下，门是打开的或安全带未系，则蜂鸣器应该报警。画出对应的逻辑电路，并写出完整的真值表。

6.28 使用积和法推导出习题 6.20 中的简化布尔表达式。

6.29 根据真值表验证例 6.4 中 S 和 C(每个对应两个)的 4 个表达式。

6.30 彻底解决课堂讨论项目 6.4 中的问题。

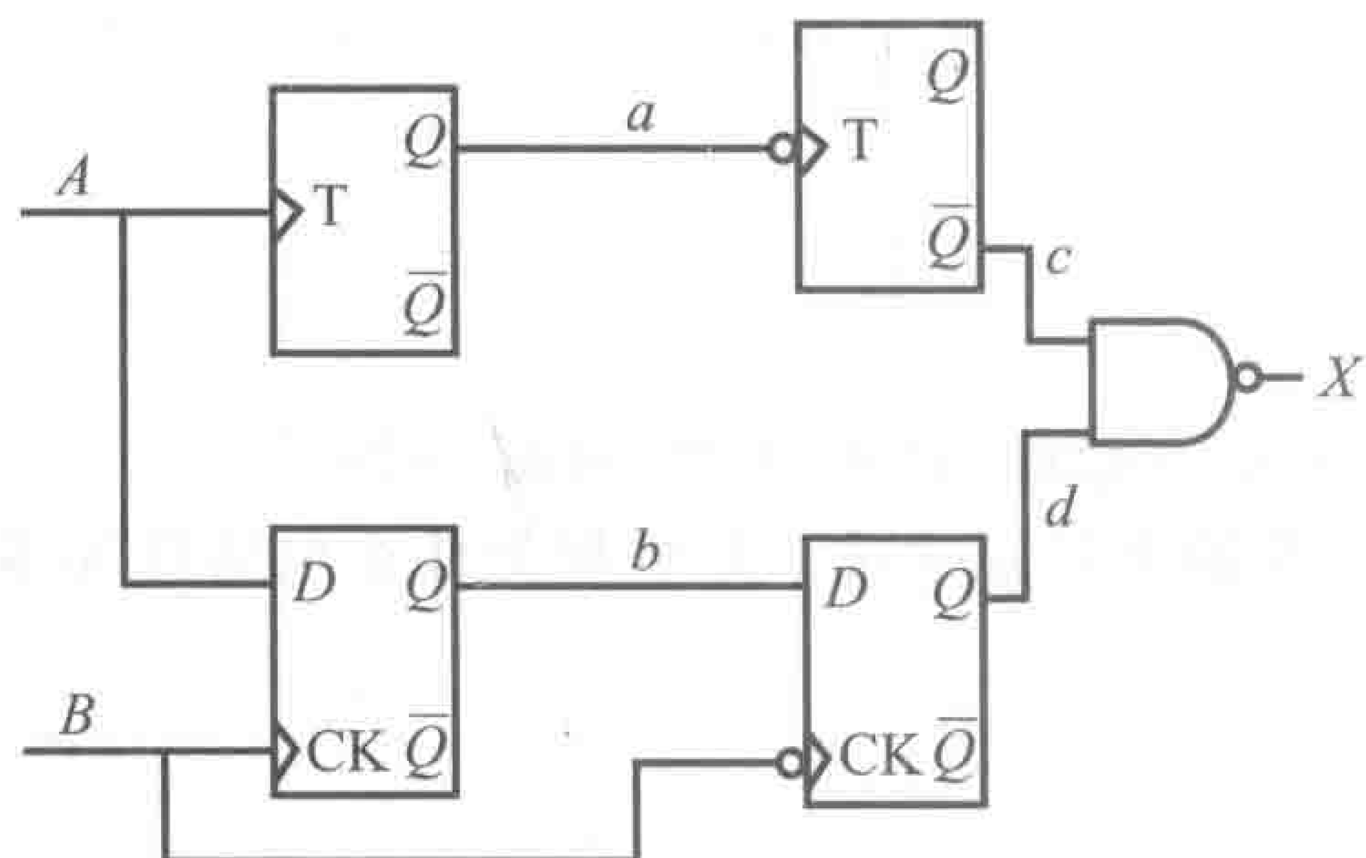
6.31 设计并绘制一个**全加法器电路**，两个求和位 A_i 和 B_i 及低阶进位位 C_{i-1} 作为输入(见例 6.4)。给出完整的真值表以及求和输出位 S_i 和进位 C_i 的积和布尔表达式。

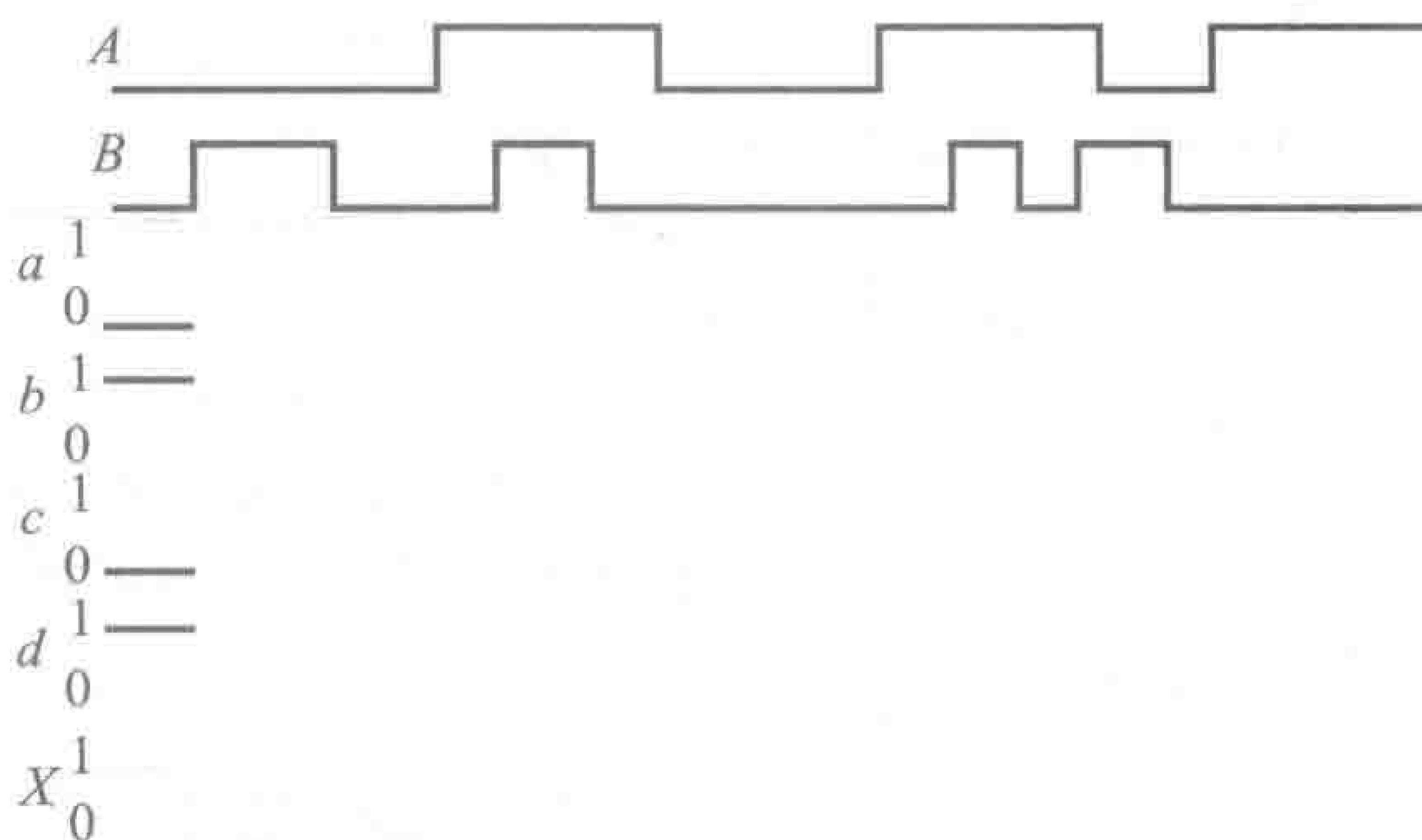
6.32 回答课堂讨论项目 6.5，解释表 6-8 中每一行的结果。

6.33 写出一个完整的下降沿触发型 T 触发器的真值表，触发器中包括预置和清除输入。

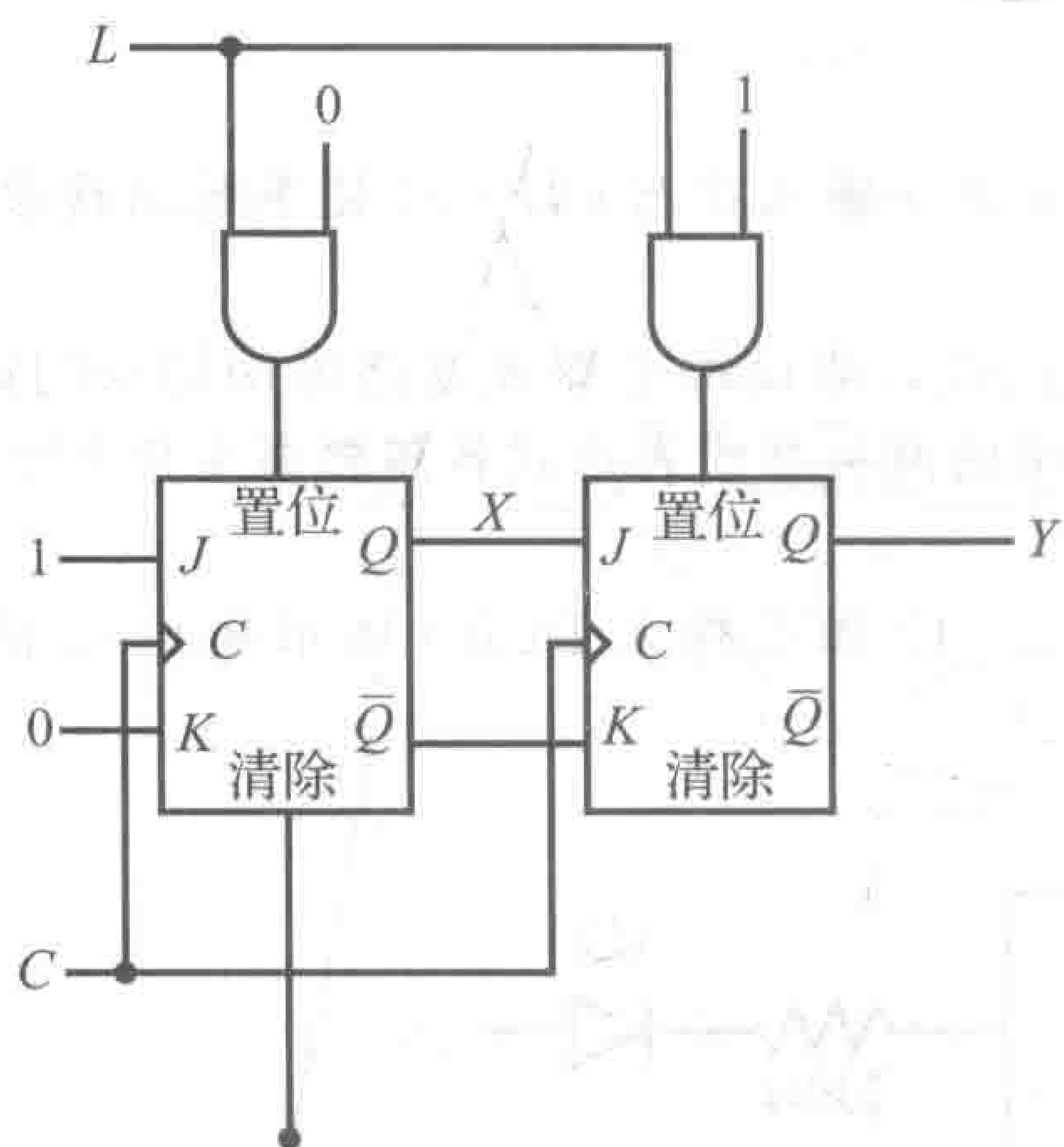
6.34 写出一个完整的下降沿触发型 D 触发器的真值表及时序图，触发器中包括预置和清除输入。

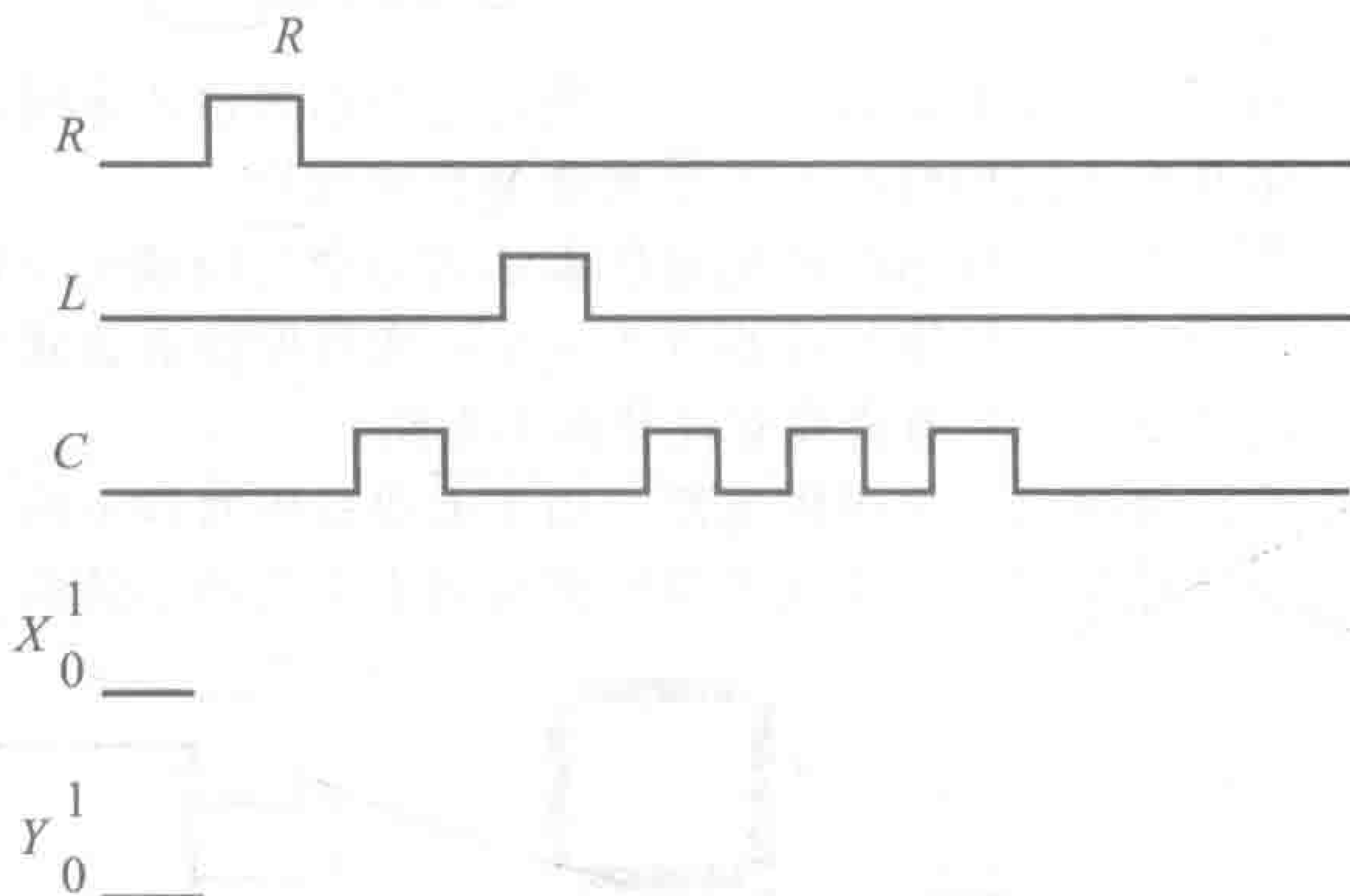
6.35 完成以下电路的时序图。



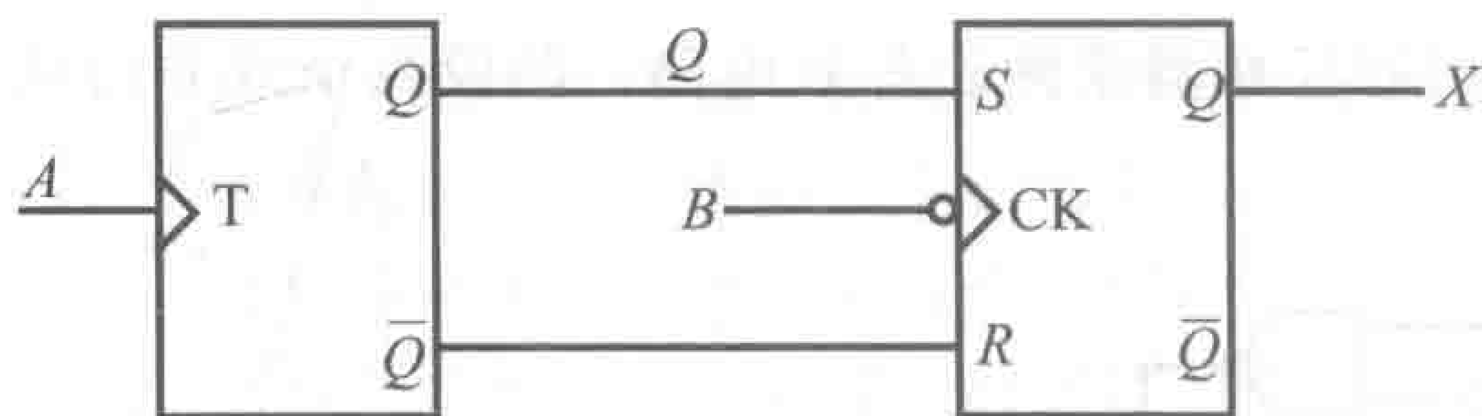


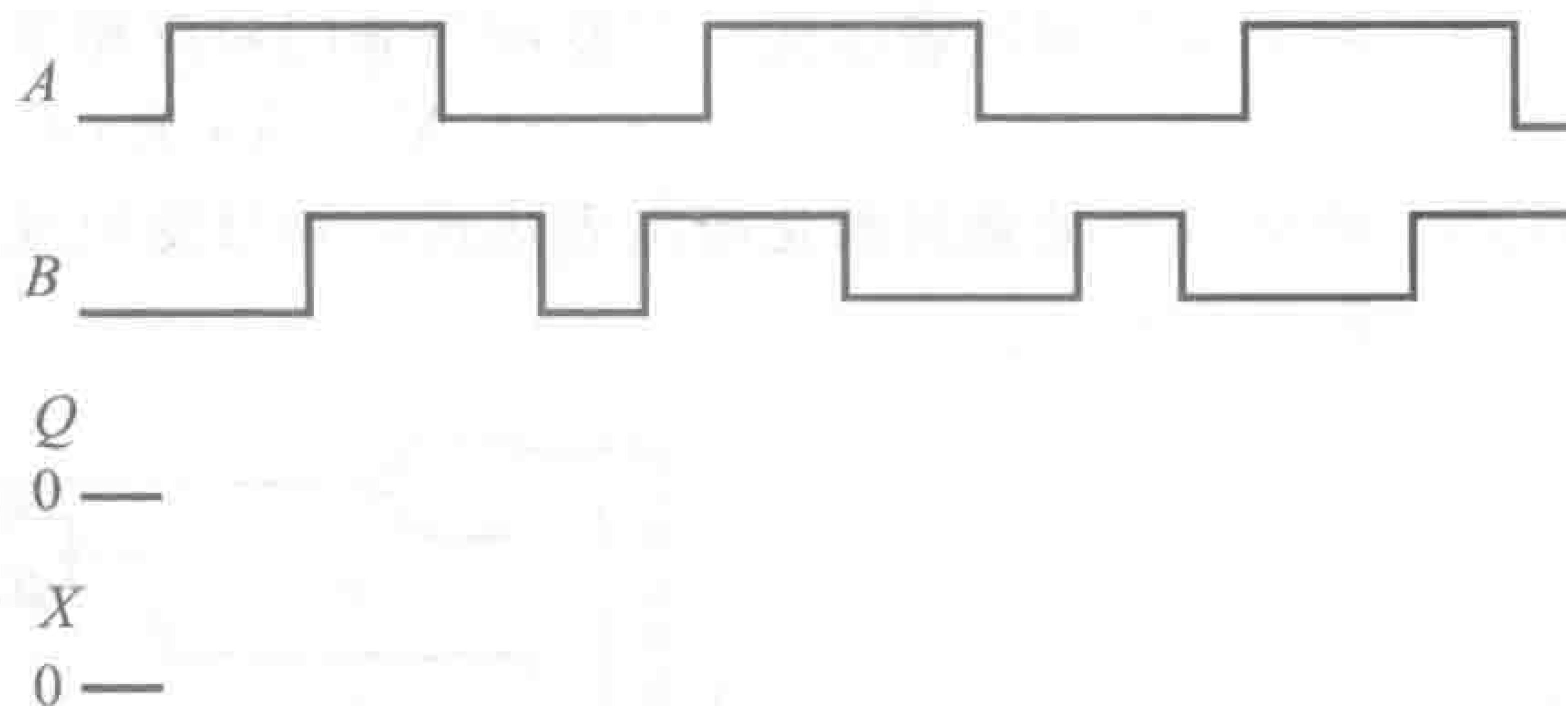
6.36 完成下面电路的时序图。





6.37 完成下面电路的时序图。





6.38 彻底解决课堂讨论项目 6.7 中的问题。

6.39 设计一个电路，当数字使能脉冲第一次变高时存储来自 4 个二进制传感器的数据(高或低)。假设使能输入为常低，高脉冲持续时间为 1s。

6.40 画出图 6-20 中所有信号的时序图，显示从 MSB 开始半字(4 位字符串)1011 传输的所有步骤。

6.41 画出图6-21中所有信号的时序图，显示从MSB开始半字(4位字符串)1011传输的所有步骤。

6.42 使用JK触发器，设计一个电路，使其时钟频率为输入时钟信号频率一半。如果输入时钟信号是不对称的，那么输出时钟信号也不对称吗？

6.43 假设你有一个数字传感器，如光遮断器，通常状态是低电平，当激活后会在短暂的、未指定的时间内变为高。设计一个电路来捕捉此传感器的输出，并保持该信号直到施加一个复位信号为止。

6.44 设计一个时序逻辑电路，当无抖动的常开按钮(参见9.2.1节)首次按下时存储SPDT开关的状态，当按钮首次按下后释放时，计数器递增。假设无抖动按钮和计数器现成的，不需要设计。绘制解决方案完整的电路图，并给出时序图，假设SPDT开关存在开关抖动。

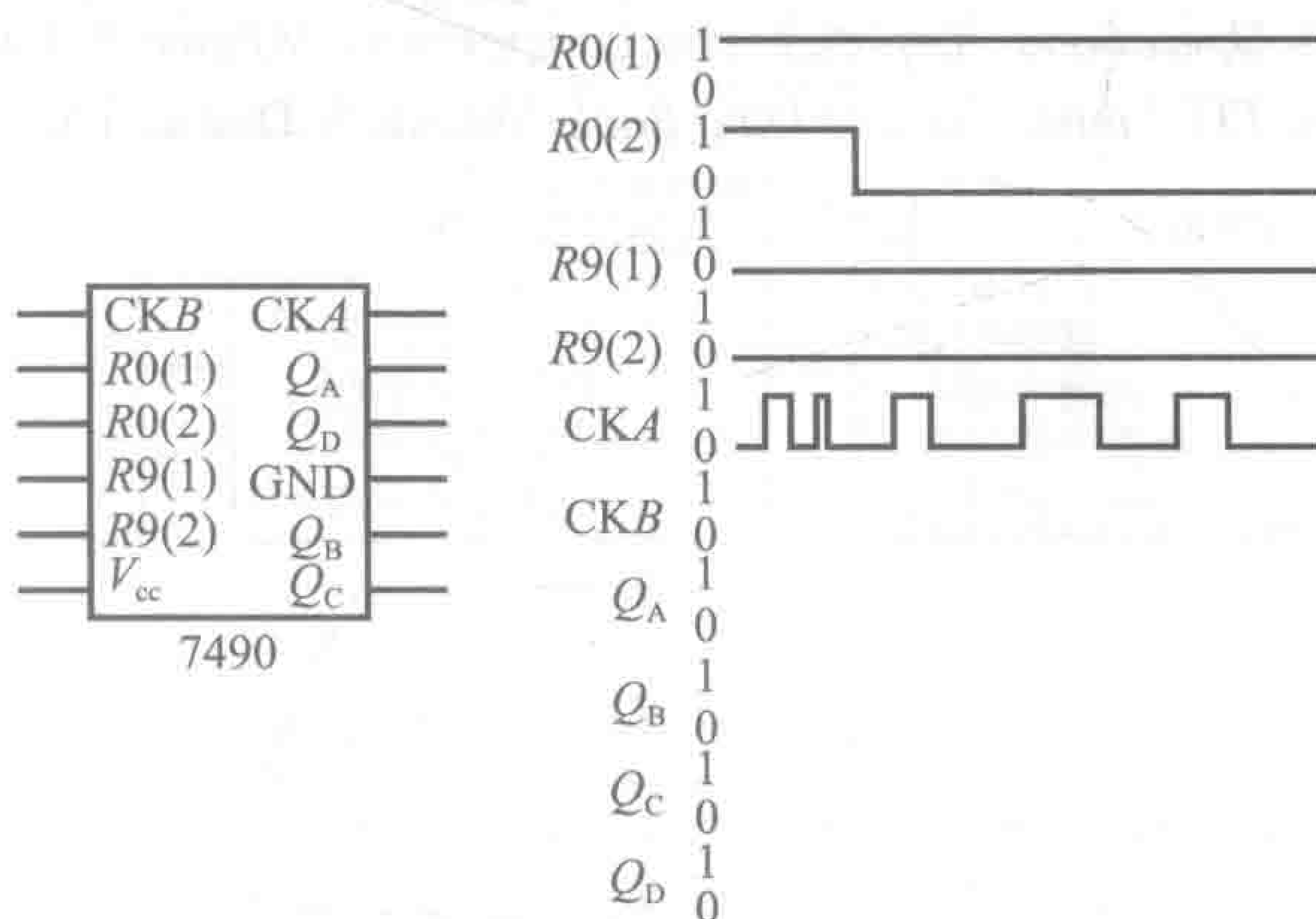
6.45 彻底解决课堂讨论项目6.12中的问题。

6.46 考虑一个74LS00与非门与4011B与非门之间的数字接口设计。画出电路原理图。

6.47 为什么CMOS输出没有较大的TTL扇出能力？

6.48 使用6.7节所给出的和积与积和方法来确定表6-11中输出列$\bar{c}$和$\bar{e}$的布尔表达式。

6.49 使用TTL数据手册中的信息来画出BCD输出的7490十进制计数器完整的原理图。时序图中包括使用4根R线实现复位功能，完成时序图。



6.50 十进制计数器与图6-19给出的4位二进制计数器有什么不同？

6.51 给定一个在0～5V内工作的施密特触发器，假设低阈值为1V，高阈值为4V。如果将以下输入信号应用到施密特触发器中，绘制出一个信号周期内施密特触发器的输出：

a. $2.5+1.0\sin(2\pi t)$V

b. $2.5+2.0\sin(2\pi t)$V

c. $1.5+1.5\sin(2\pi t)$V

d. $3.0+1.5\sin(2\pi t)$V

6.52 确定以电阻和电容值表示的单稳电路的精确脉冲宽度[见式(6-36)]。

6.53 设计和绘制555振荡器产生1Hz时钟信号的原理图。

6.54 显示推导式(6-42)所有必要的详细步骤。

6.55 彻底解决课堂讨论项目6.14中的问题。

6.56 彻底解决课堂讨论项目6.16中的问题。

6.57 在数字手册中查找74LS90十进制计数器。使用所找到的信息来设计一个电路，该电路可以在出现100个数字事件后打开LED灯。该设计应该有原理图。在原理图中包括IC十进制计数所需的输入编码细节。

6.58 对于习题6.44，你或你的指导者所设计的电路，验证开关抖动(从SPDT开关)是否有影响。此外，如果常开按钮存在抖动，电路是否仍然能正常工作？如果不能，如何修改设计来处理该问题？

6.59 假设有一个硬币收集槽，放入的10分、5分和25分硬币总是沿着槽的底部滑落。光学传感器可以放置在任何高度上来检测划过收集槽的硬币。当光束被打断时，传感器的输出为高，否则，为低。设计一个系统，当10分硬币通过时点亮红色LED，当5分硬币经过时点亮黄色LED，当25分硬币通过时点亮绿色LED。

6.60 假设已成功地解决了习题6.59，扩展你的设计，使得其能够对各类硬币的数量进行计数。

参考文献

Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics,* 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

Mano, M., *Digital Logic and Computer Design,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.

McWhorter, G. and Evans, A., *Basic Electronics,* Master Publishing, Richardson, TX, 1994.

Mims, F., *Getting Started in Electronics,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5003A, 1991.

Mims, F., *Engineers Mini-Notebook: 555 Circuits,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5010, 1984.

Mims, F., *Engineer's Mini-Notebook: Digital Logic Circuits,* Radio Shack Archer Catalog No. 276-5014, 1986.

Stiffler, A., *Design with Microprocessors for Mechanical Engineers,* McGraw-Hill, New York, 1992.

Texas Instruments, *TTL Logic Data Book,* Dallas, TX, 1988.

Texas Instruments, *Operational Amplifiers and Comparators,* Volume B, Dallas, TX, 1995.

Texas Instruments, *TTL Linear Circuits Data Book,* Volume 3, Dallas, TX, 1992.

第7章 微控制器编程和接口

本章节描述了如何对微控制器进行编程及连接和各种输入-输出设备。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 理解微处理器、微型计算机和微控制器之间的差异；
2. 了解与微型计算机和微控制器相关的术语；
3. 了解微控制器的结构和操作原理；
4. 了解汇编语言程序设计的基本概念；
5. 了解高级编程语言的基本知识，如 PicBasic Pro；
6. 能够编写程序来控制 PIC 微控制器；
7. 能够连接微控制器到输入和输出设备；
8. 能够设计以微控制器为基础的机电一体化系统；
9. 了解帮助你制作原型系统、编程和调试微控制器系统的实际问题；
10. 能够为微处理器系统选择适当的供电电源。

7.1 微处理器和微型计算机

第 6 章给出的数字电路能够通过集成电路（包括门电路和触发器）的互连实现组合和时序逻辑操作。它通过选择特定的 IC 在电路板上进行硬连线以实现预定的功能，是一种**硬件**解决方案。当功能改变时，必须修改硬件电路或重新设计。对简单的设计任务，这种方法是可以接受的（如 6.6 节中给出的安全系统和设计实例 6.1 中给出的数字转速表）。然而，在许多机电一体化系统中，控制任务可能会涉及许多输入和输出之间的复杂关系，单纯地通过硬件解决方案来解决问题是不切实际的。更为完善的方法是在复杂的数字设计中使用一个基于微处理器的系统，通过**软件**来解决问题。软件是由一组指令组成的过程编程从而执行逻辑或算术功能，通过它可以访问输入信号及控制输出信号。软件解决方案的一个优势是，在不改变硬件的情况下可以改变机电系统的功能。

微处理器是一个单独的、大规模集成芯片（VLSI），它包含许多数字电路以实现算术、逻辑、通信和控制功能。当微处理器中包含印制电路板和其他组件，如接口和记忆芯片时，这

一整体称为**微型计算机**或**单板计算机**。图 7-1 所示为一个典型的微型计算机系统的总体结构。

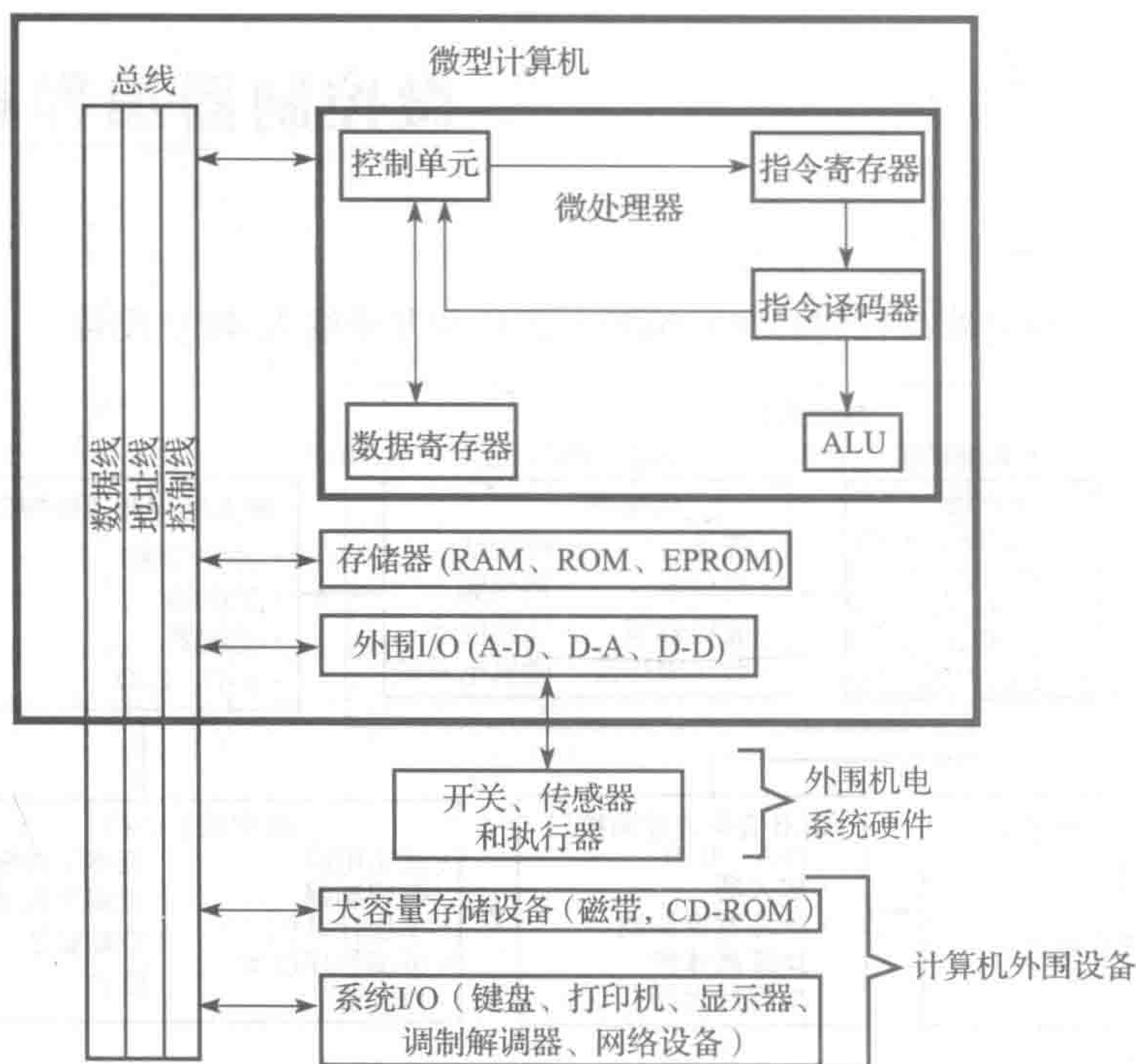


图 7-1　微型计算机的结构

微处理器也称为**中央处理单元**(CPU)或**微处理器单元**(MPU)，是计算和系统控制的核心。CPU 内部的**算术逻辑单元**(ALU)采用二进制数据结构完成数学运算。**字**是位的有序组合，通常为 8、16、32 或 64 位长。指令译码器对由控制单元从内存中有序获取的和存储在指令寄存器中的指令进行解释。每条指令是一组位编码，它指示 ALU 对存储于 CPU 数据寄存器内的字进行位操作，如二进制加法和逻辑运算。ALU 计算的结果存储于数据寄存器中并由控制单元转存至存储器中。

总线是一组共享的通信线路，是计算机的中枢神经系统。通过总线，系统元器件可以共享数据、地址和控制信号。每个元器件连接到总线，并通过自己的总线控制器来通信。数据线、地址线和控制线能够允许寻址选中的特定元器件访问数据。**数据线**用于与存储器、CPU 和输入/输出(I/O)设备等各系统元器件的数据寄存器进行数据通信。**地址线**用来选择总线上的设备及内存中特定数据的位置。外围设备通常有一个组合逻辑地址译码电路来识别相应的地址代码以激活设备。**控制线**传输读和写信号、系统时钟信号和其他控制信号，如系统中断信号等。

CPU 运行的关键是在一个存储设备中进行数据存储和检索。不同的存储器类型包括：**只读存储器**(ROM)、**随机读取存储器**(RAM)和**可擦可编程只读存储器**(EPROM)。ROM 用于永久存储供 CPU 读取的数据，但 CPU 不能向 ROM 写入数据，ROM 不需要电源来保持数据，因此称为非易失存储器。RAM 可以随时读取或写入，但需要提供电源。RAM 中的数据在掉电时会丢失，因而认为是易失的。这类 RAM 主要有两种类型：**静态随机存取存储器**(SRAM)和**动态随机存取存储器**(DRAM)，其中只要存储器有电，SRAM 将把数据保留在触发器中；DRAM 中的数据是由电容存储的，由于电荷的泄露，它必须周期性地重写。EPROM 中存储的数据可以通过一个透明的石英窗口用紫外线来擦除，然后再在 EPROM 中存储新数据。另一种类型是**电可擦 EEPROM**，其中的数据可以用电来擦除并通过数据线重写，而不需要使用紫外线。因为数据在 RAM 中是不稳定的，所以有时为了

永久存储数据，需要使用 ROM、EPROM、EEPROM 以及外围大容量存储设备(如磁性、光学、固态硬盘等)。

微处理器可以通过总线连接到 I/O 设备上。计算机的外围 I/O 设备主要包括：键盘、打印机、显示器和网络设备等。对于机电应用系统来说，模-数转换(A-D)、数-模转换(D-A)和数字 I/O 设备(D-D)为开关、传感器和执行器提供了相应的接口。

CPU 执行的指令是名为**机器代码**的二进制代码。指令及其代码依赖于微处理器。每条指令都由一个唯一的二进制字符串来表示，并驱动微处理器执行底层功能(如寄存器加一个数或将寄存器存储的数据转存至存储器)。微处理器可以使用**汇编语言**编程，每个指令都有对应的指令符号(如 ADD 表示往寄存器中加一个数，MOV 表示将寄存器存储的数据转存至存储器)。然而，汇编语言必须通过**汇编器**转换成机器代码才可以被微处理器执行。当指令集较小时，微处理器称为 RISC(精简指令集计算机)微处理器。RISC 微处理器的设计和制造成本更低，运行也更快。然而由于它有有限的指令集，所以对复杂算法可能需要更多的编程步骤。

如果有所用微处理器的编译器，程序也可以通过如 BASIC 或 C 等高级语言来编写，编译器可以生成特定的微处理器所使用的机器代码。高级语言的优点是容易学习和使用、程序更容易调试(发现和消除错误)且程序更易理解。其缺点是生成的机器码相对于良好设计的汇编程序效率偏低(执行速度慢且需要更多的内存)。

7.2 微控制器

微处理器的发展有两个分支，一个是用于个人计算机和工作站的 CPU，其特点是高速和更宽的数据字(32 位和 64 位)。另一个是**微控制器**，其内部集成了用于机电一体化系统设计的特殊电路和功能，包括微处理器、存储器、I/O 和其他片上资源。基本上可将单集成电路视为微型计算机，如微芯公司的 PIC 系列、摩托罗拉的 68HC11 及英特尔的 8096 等。

网络连接 7.1 指向各种微控制器的在线资源和对应的制造商。网上具有丰富可用的在线信息，伴随着制造商不断发布具有更快速度、更大内存和更多功能的新产品，这些信息不断更新。驱动微控制器进一步发展的因素在于低成本、多功能性、易于编程及小尺寸。由于微控制器体积小、功能全且具有可嵌入性等优点，使得微控制器在机电系统设计中更具吸引力。

微控制器广泛应用于各类应用中，包括家电、娱乐设备、通信设备、汽车、卡车、飞机、玩具和办公设备等。所有这些产品都需要根据各种输入来实现某种智能控制。例如，微波炉的微控制器监视用户输入控制面板，必要时更新图形显示，定时并完成必要的烹饪功能。汽车为了控制不同的子系统采用了许多微控制器，包括巡航控制、防抱死、点火控制、无钥匙开启、环境控制、空气和燃料流量控制。办公室复印机能够控制执行器喂纸，使用照片传感器扫描页面，通过网络连接发送或接收数据，并提供一个包括使用菜单驱动控制的用户界面。玩具机器狗通过各种传感器检测环境输入(例如，撞到障碍物、被拍了拍头、光照强弱、语音指令等)，并根据这些输入通过一个内置的微控制器驱动电动机来模拟狗的实际行为(如狗吠、坐和行走等)。这些强大和有趣的设备都是基于微控制器控制的，并通过其内部运行的软件实现的。

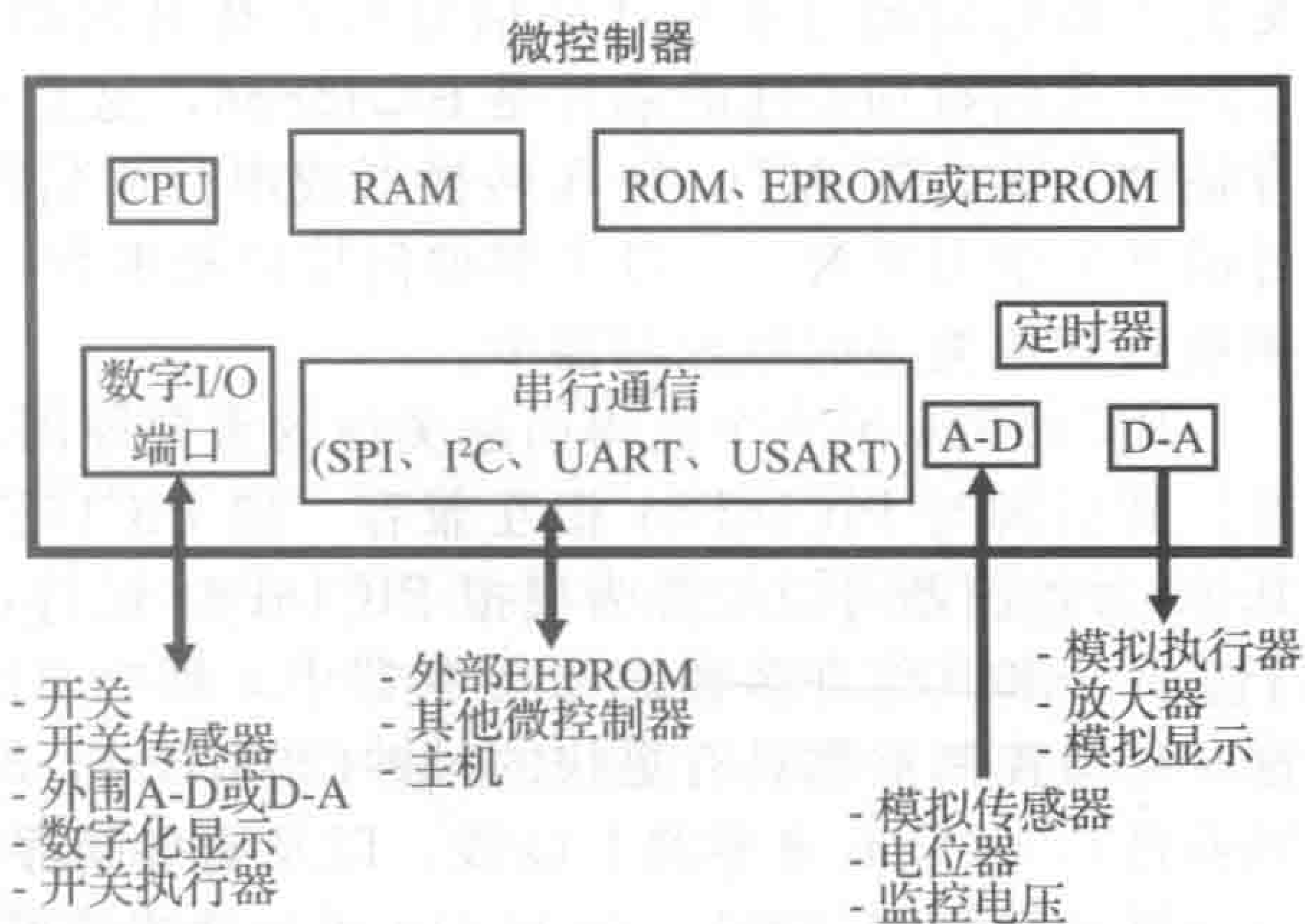


图 7-2 典型全功能微控制器的框图

图 7-2 所示为一个典型全功能微控制器的框图。图中还包括了典型的外部设备接口。微控制器的组成部分包括 CPU、

RAM、ROM、数字I/O端口、串行通信接口、定时器、模-数转换器(A-D)和数-模转换器(D-A)。CPU执行存储在ROM中的软件，并控制所有的微控制器设备。RAM用于存储执行程序所使用的数据。ROM用来存储程序和永久不变的数据。设计者可以将程序和数据通过芯片制造商存储于CPU内部的ROM中，也可以采用EPROM或EEPROM自行编程。永久存储在ROM中的软件称为**固件**。微控制器制造商提供编程工具，它可以直接利用计算机串口和微控制器的特殊功能引脚下载编译后的机器代码存储至微控制器内的EEPROM中。这些引脚编程完成后可以用作其他功能。其他可用的EEPROM在执行期间可以通过程序生成或修改的设置和参数来获得。EEPOM中的数据是非易失的，这意味着即便微控制器电源关闭后重新打开，程序依然存在，并可重新执行。

数字I/O**端口**允许二进制数据通过微控制器的外部引脚进行传送。这些引脚可以用来读取开关状态、开关传感器、与外部A-D和D-A转换器的接口、控制数字显示、控制开关执行器。I/O端口也可以用来与其他微控制器传送信号以协调各种功能。微控制器也可以使用一个串行端口与外部设备交换数据，只要这些设备遵循相同的串行通信协议。这类设备包括：可能为微控制器存储大量数据的外部EEPROM、需要共享数据和协调控制的其他微控制器以及用于下载程序至微控制器EEPROM上的主计算机。串行通信标准或协议有很多种，包括SPI(串行外围接口)、I^2C(内部集成电路总线)、UART(通用异步收发总线)、USART(通用同步异步收发总线)。

微控制器的A-D转换器允许将外部模拟电压转换(通过传感器获取)为一个数字值，并通过CPU进行处理或存储。D-A转换器允许微控制器输出一个模拟电压到非数字化设备(如电动机放大器)中。A-D和D-A转换器及相关应用程序将在第8章中进行讨论。板载定时器通常用于提供延时或保证事件发生在精确时间间隔(如读取传感器的数值)。

微控制器的程序存储器通常从小于1KB到数十KB，而微型计算机的RAM可达兆或吉字节。同时，微控制器的时钟速度比微型计算机更慢。对于某些应用来说，所选微控制器可能没有足够的速度或内存来满足应用需求。幸运的是，微控制器制造商通常提供品种众多的产品，以适应不同的应用场合。另外，当需要更多的内存或I/O能力时，微控制器的功能可以通过外部器件进行扩展(如RAM或EEPOM芯片，外部A-D和D-A转换器及其他微控制器)。

本章的剩余部分将集中讨论微芯公司PIC系列的微控制器，因为该系列微控制器应用广泛、信息资源丰富、成本低廉且易于使用。**PIC**是外围接口控制器的缩写，微芯公司用这个缩写来指代其微控制器系列芯片。微芯公司提供了一个庞大而多样的低成本PIC系列产品，它们的封装(外形尺寸)、可用I/O引脚数量、EEPROM和RAM的容量以及可用的A-D和D-A转换器各不相同。显然，当微控制器需要更多的功能和容量时，成本也将更高。微芯公司完整的产品信息可以在其网站www.microchip.com上找到(见网络链接7.2)。我们特别关注的芯片是**PIC16F84**，这是一种低成本的8位微控制器，具有EEPOM存储器，无内置A-D、D-A转换器或串行通信端口，但它有13根数字I/O线，是一种良好的开发学习平台。一旦了解如何接口和编程一种微控制器，就可以很容易地将相关知识拓展到其他类型的微控制器中。

PIC16F84另一个值得引起关注的重要原因是许多其他PIC微控制器都是向上兼容的，并且其引脚与PIC16F84相互兼容。如PIC16F84A、PIC16F88、PIC16F819。这3个(和其他)微控制器可以配置为模拟PIC16F84运行，从PIC16F84中学到的知识可以直接应用于这几个和其他许多微芯微控制器中。那么84A、88和819与84有哪些不同呢？首先，这3种微控制器都具有更快的时钟(20MHz)。88和819具有内部振荡器(可不需要外部时钟器件)，并且有更多的I/O线，以及更多的存储容量和额外的软件配置功能(如片内比较器和脉冲宽度调制器)。88和819还包括软件可配置的A-D转换器，它提供了模拟输出传感器(直接输出连续的电压信号而不是数字信号)与PIC的接口。

课堂讨论项目 7.1　**汽车的微控制器**

列出你认为由微控制器控制的各种汽车子系统，给出各子系统微控制器中所有的输入和输出，并描述其软件功能。

7.3　PIC16F84 微控制器

PIC16F84 微控制器的框图如图 7-3 所示。这个框图以及这个微控制器完整的特性和功能数据都可以在制造商的数据手册中找到。PIC16F8X 数据手册包含在微芯公司出版的相关书籍中，并且其网站也提供了相应的 PDF 文件(见网络链接 7.3)。PIC16F84 为 8 位 CMOS 微控制器，带有 1792 字节的 EEPROM 程序存储器，68 字节的 RAM 数据存储器和 64 字节的非易失性 EEPROM 数据存储器。1792 字节的程序存储器的字宽为 14 位，因为其机器代码指令的宽度为 14 位。即 EEPROM 可以容纳 1024(1KB)条指令。PIC16F84 的时钟频率可到 10MHz，但在实际应用时通常采用 4MHz 的时钟。

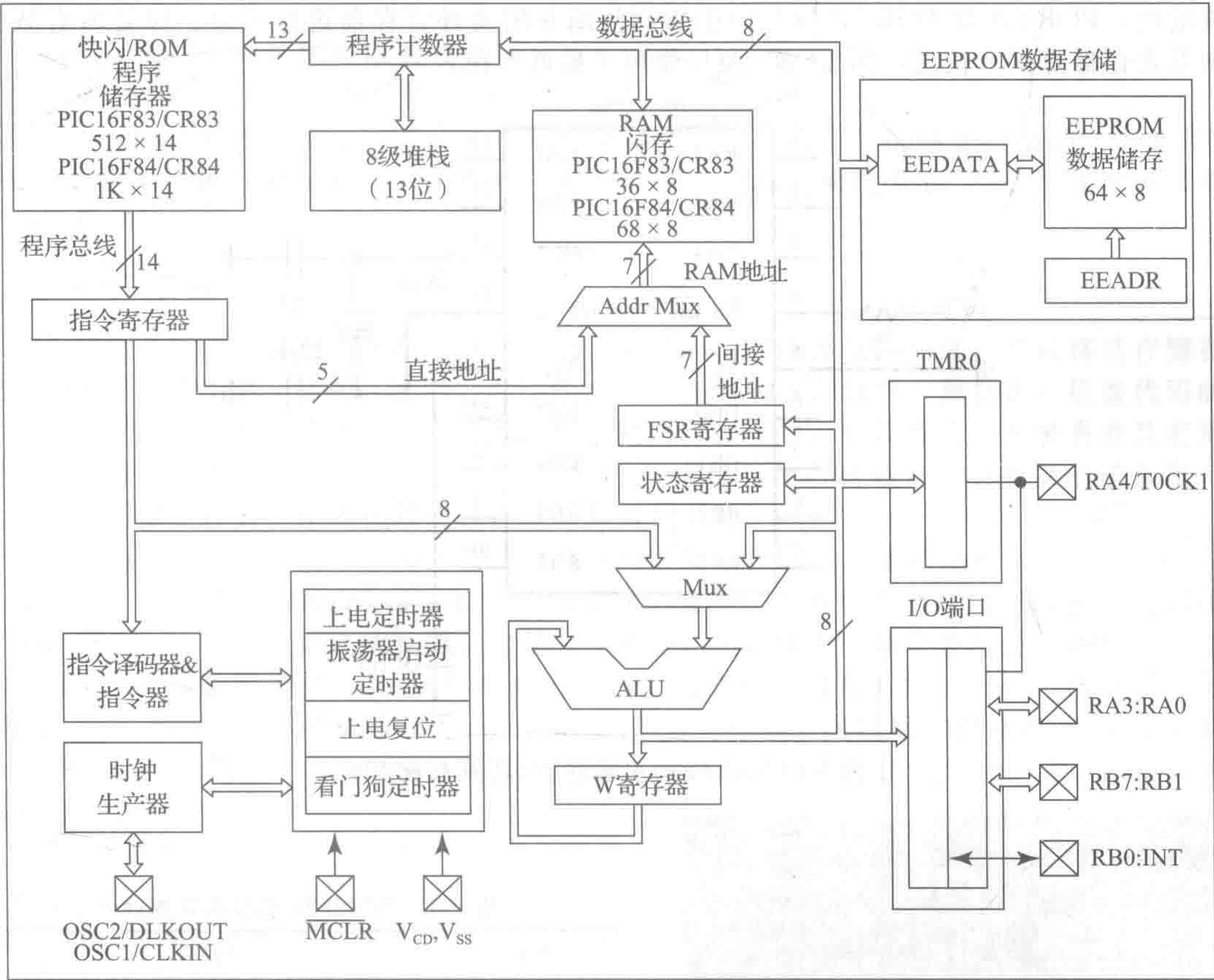


图 7-3　PIC16F84 功能框图(由微芯技术公司提供)

当程序编译并下载至 PIC 时，它以一组二进制机器代码指令的形式存储于程序存储器中。这些指令按顺序从内存中取出，放入指令寄存器中并执行。每条指令对应着一个通过片内逻辑电路实现的底层功能。例如，一条指令可能将存储于 RAM 或 EEPROM 中的数据装载至 CPU **工作寄存器**，即 **W 寄存器**或**累加器**；下一条指令则命令 ALU 将一个不同的数与工作寄存器相加，再下一条指令则可能将两者之和重新保存至存储器中。因为每 4 个时钟周期执行一条指令，所以 PIC16F84 可以根据指令快速地完成计算、读取输入值、

从内存中存储和检索信息或其他功能。当时钟速度为 4MHz 时，一条指令的执行时间为 1μs，也就是说每秒钟可以执行 100 万条指令。因为其数据总线是 8 位宽度的，所以它是 8 位微控制器，并且所有数据的处理、存储和检索都是以字节的形式实现的。

在 PIC 微控制器中包括一个专用的计时器，称为**看门狗定时器**。当激活这个倒计时定时器后，需要程序不断对其复位。如果程序在该定时器值减至 0 之前未对其复位，则微控制器将会自动复位。在关键的应用程序中，如果程序陷入无意的死循环中，则可以使用该功能对微控制器进行复位。

RAM 除了提供空间存储数据之外还提供了一组专用的字节宽度的**文件寄存器**。这些寄存器中的内容用于控制功能和显示微控制器的状态。下文将给出这些寄存器的介绍。

PIC16F84 封装在图 7-4 所示的一个 18 个引脚 DIP 封装的 IC 芯片中。该图还显示了维持 PIC 微控制器正常工作所需要的最少的外部元器件。在图 7-4 所示原理图中实际元器件组装在面包板上的照片，如图 7-5 所示。表 7-1 列出了 PIC16F84 引脚标识符及其功能描述。从 RA0～RA4 的 5 个数字 I/O 引脚统称为 **PORTA**，从 RB0～RB7 的 8 个数字 I/O 引脚称为 **PORTB**。总共有 13 路**双向** I/O，因为每条 I/O 线都可以单独由软件配置为输入或输出。PORTA 和 PORTB 与 I/O 引脚间使用专用文件寄存器进行接口。尽管所有微控制器寄存器都是 8 位的，但 PORTA 只使用了最低 5 位。

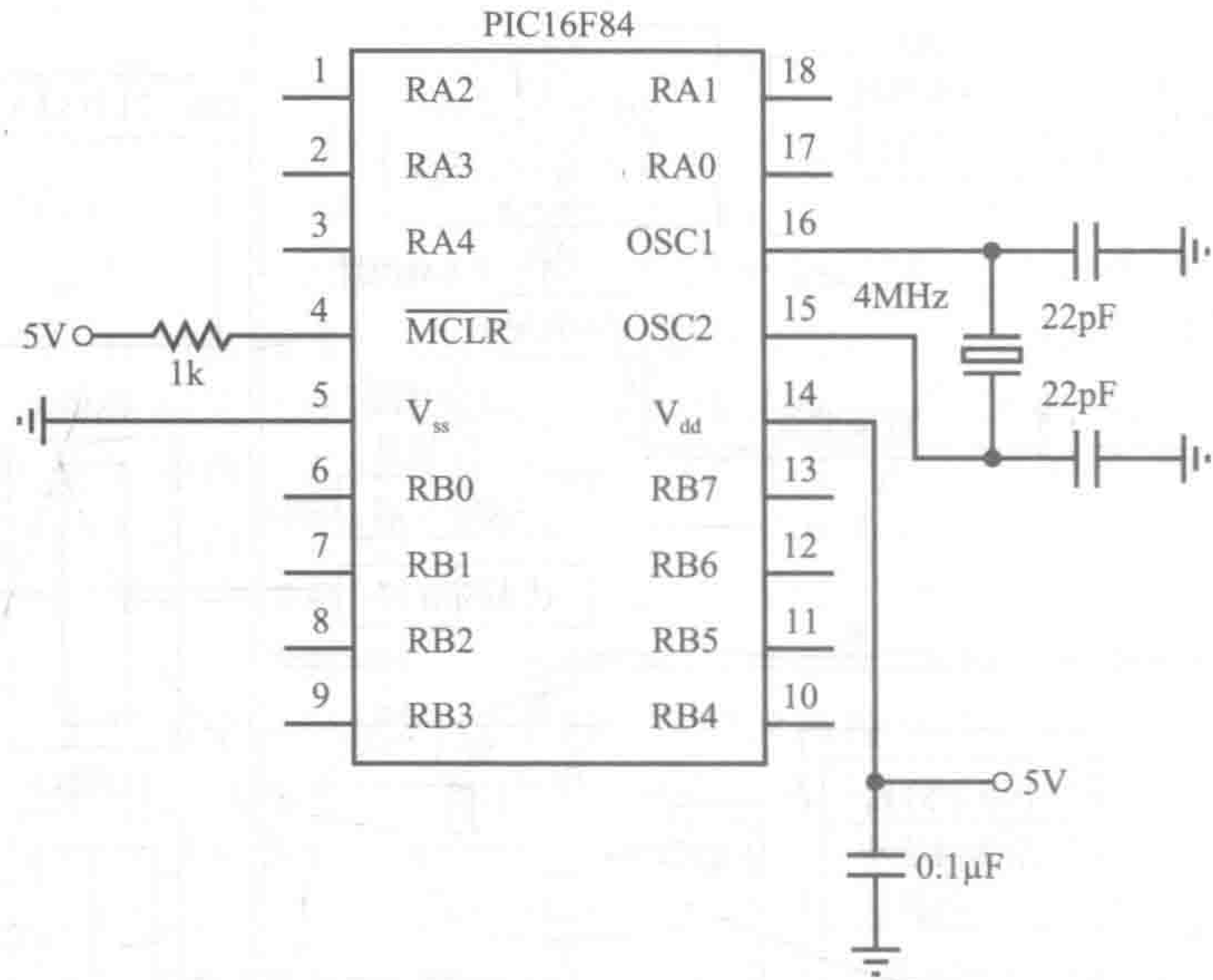


图 7-4　PIC16F84 引脚图及所需外部元器件

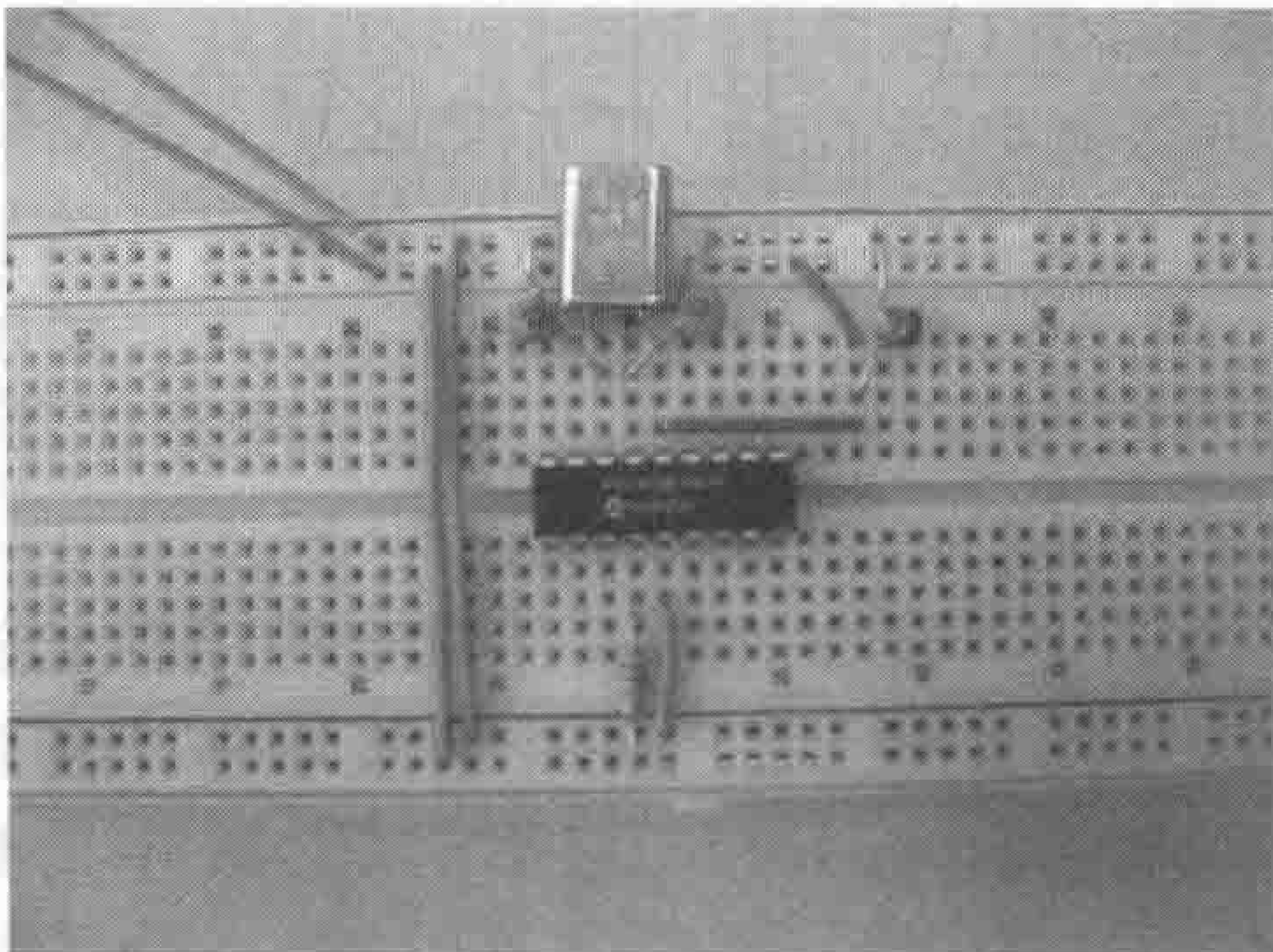


图 7-5　面包板上的 PIC16F84 及其外部元器件

表 7-1　PIC16F84 引脚名称描述

针号	描述
RA0～RA4	5 位双向 I/O(PORTA)
RB0～RB7	8 位双向 I/O(PORTB)
V_{ss}、V_{dd}	电源地参考(ss：源极)和正电源(dd：漏极)
OSC1、OSC2	晶体振荡器的输入
$\overline{MCLR}$	MCLR 主复位(低电平有效)

与大多数微控制器一样，PIC的一个重要特征是其中断处理能力。当特定的输入状态发生变化时将产生**中断**。中断时，正常运行的程序挂起，转而去执行一个特殊的中断处理程序。这部分将在7.6节中进一步讨论，在PIC16F84中，引脚RB0、RB4及RB7可以配置为中断输入。

电源和参考地通过引脚V_{dd}和V_{ss}与微控制器相连接，因为PIC微控制器是一个CMOS器件，下标dd和ss来源于MOS晶体管的漏极和源极符号。电压(如$V_{dd}=5V$，$V_{ss}=0V$)可以由直流电源或电池来提供(如通过4节AA电池串联或使用9V电池通过一个电压稳压器连接)。当主复位引脚($\overline{MCLR}$)处于低电平状态时，可用于复位。这个引脚接地会导致PIC复位并重新运行存储在EEPROM中的程序。只有该引脚处于高电平时，程序才能正常执行。上述过程由图7-4所示的上拉电阻来实现，如果该引脚未连接(浮动)，芯片可能偶尔会自行复位。当然也可以通过添加一个图7-6所示的常开(NO)按钮开关来提供手动复位功能。按下开关使该引脚接地从而使微控制器复位。

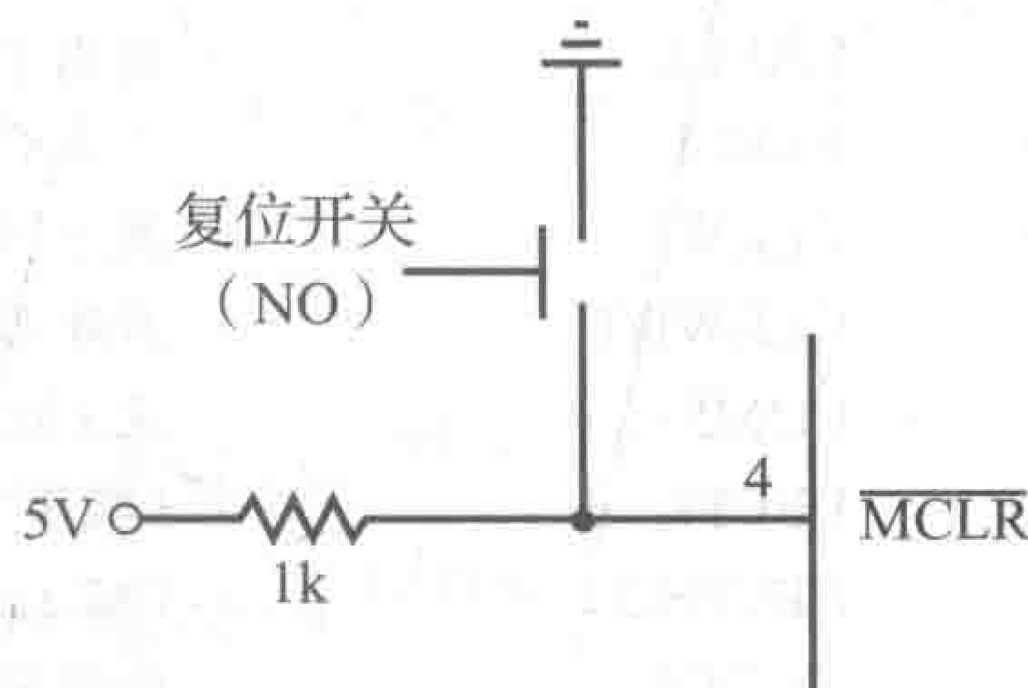


图7-6　复位电路

微控制器的**时钟**频率可以通过不同的方法来控制，包括外部RC电路、外部时钟源或一个时钟晶体。如图7-4所示，我们通过使用一个相对较低成本的时钟晶体可以提供一个准确和稳定的时钟频率。如图7-4所示，将一个4MHz的晶振与OSC1、OSC2连接并通过22pF的电容接地可以设置时钟频率的参数。

7.4　PIC编程

在机电系统设计过程中使用微控制器时，必须编写软件并进行测试，然后将其存储在微控制器的ROM中。通常，使用个人计算机(PC)编写和编译软件，然后再以机器代码的形式下载到微控制器芯片中。如果程序是用汇编语言编写的，则计算机必须装有**交叉汇编器**来生成微控制器机器代码。汇编器是在PC上生成机器代码的软件，而交叉汇编器则可以生成不同微处理器使用的机器代码，此处是微控制器。

不同的软件开发工具可以协助测试和调试用汇编语言编写的微控制器程序。其中之一是**模拟器**，它在PC上模拟微控制器代码的运行，这样大多数编程错误可以在模拟过程中发现并改正。另一种工具是**仿真器**，它是一个硬件，通过机电一体化系统原型样机上的微控制器可以直接连接到PC。仿真器通常包括一块通过扁平电缆连接至机电一体化系统的印制电路板。仿真器可在实际机电一体化系统(包含传感器、执行器和控制电路)的微控制器上加载和运行程序。当微控制器嵌入到机电一体化系统中时，仿真器允许PC监视和控制微控制器的运行。

PIC16F84汇编语言包含35条命令，这组命令称为微控制器的**指令集**。每个品牌的微控制器都有自己特定的指令集，以便对芯片上的可用资源进行访问。表7-2所示为PIC16F84的完整指令集和简短说明。每个命令包含一个**助记符**和相应的操作数列表。操作数必须提供具体的数值，字母f、d、b和k分别表示文件寄存器的地址(有效的RAM地址)、执行结果的存储地址(0：W寄存器、1：文件寄存器)、位数(0～7)和字符常数(0～255)。注意许多指令指向工作寄存器W，即累加器，这是一个专用的CPU寄存器，用于暂存计算和比较结果。粗略看起来，表中的这些助记符和说明似乎很神秘，但与相关术语和命名规则对比后就可发现这些助记符和说明很容易理解。在例7.1中，我们引入了一些语句，并提供了一些示例。我们将在例7.2中演示如何编写一个完整的汇编语言程序。

表 7-2 PIC16F84 指令集

助记符和操作数	具体描述	助记符和操作数	具体描述
ADDLWk	常量 k 与 W 相加	IORLWk	k 与 W 进行同或操作
ADDWFf，d	W 与 f 相加	IORWFf，d	W 与 f 进行同或操作
ANDLWk	数据 k 与 W 相与	MOVFf，d	移动 f
ANDWFf，d	W 和 f 相与	MOVLWk	将 k 移到 W
BCFf，b	清除 f 的 b 位	MOVWFf	将 W 移到 f
BSFf，b	设置 f 的 b 位	NOP	空操作
BTFSCf，b	f 位测试，0 则跳过	RETFIE	中断返回
BTFSSf，b	f 位测试，1 则跳过	RETLWk	W 带数值返回
CALLk	调用子程序	RETURN	子函数返回
CLRFf	清除 f	RLFf，d	f 左移 1 位
CLRW	清除 W	RRFf，d	f 右移一位
CLRWDT	清除看门狗定时器	SLEEP	进入待机状态
COMFf，d	求 f 的补	SUBLWk	从 k 中减去 W
DECFf，d	f 减 1	SUBWFf，d	从 f 中减去 W
DECFSZf，d	f 减 1，如果为 0 则跳过	SWAPFf，d	f 半字节交换
GOTOk	跳转至地址 k	XORLWk	数据与 W 进行异或操作
INCFf，d	f 加 1	XORWFf，d	W 与 f 进行异或操作
INCFSZf，d	f 加 1，如果为 0 则跳过		

更多信息(如详细描述和每个汇编语句的示例)请参阅 PIC16F8X 数据手册(参见网络链接 7.3)。

例 7.1 编程语言指令的细节

在这里，我们提供汇编语言指令更详细的描述和一些例子，以帮助您更好地理解术语和命名规则。

BCFf，b

(BCF 读为“bit clearf”)

将文件寄存器 f 的第 b 位清零，位计数从 0(最低有效位，LSB)至 7(最高有效位，MSB)；

例如，BCF PORTB，1 使得 PORTB 的第 1 位置零(PORTB 是一个常数，包含 PORTB 文件寄存器的地址)。如果 PORTB 包含十六进制数值 FF(二进制为 11 111 111)，其最终结果将是十六进制值 FD(二进制为 11 111 101)。如果 PORTB 原来为十六进制值 A8(二进制为 10 101 000)，指令执行后，原值将保持不变。

MOVLWk

(MOVLW 读为“move literal to W”)

存储常数 k 至累加器(W 寄存器)

例如，MOVLW 0xA8 将存储十六进制值 A8 到 W 中。在汇编语言中，十六进制的常量通常以 0x 作为前缀标识。

RLFf，d

(RLF 读为“rotate f left”)

将寄存器 f 左移 1 位，如果 d 等于 1 则结果存储于 f 中，如果 d 等于 0，则结果存储于累加器(W 寄存器)中。移位后 LSB 的值将变为 0，而 MSB 的原始值将丢弃。

例如，若 PORTB 的当前值是十六进制值 1F(二进制为 000 111 11)，则 RLFPORTB，1 将使得其值变为十六进制值 3E(二进制为 001 111 10)。

SWAPFf，d

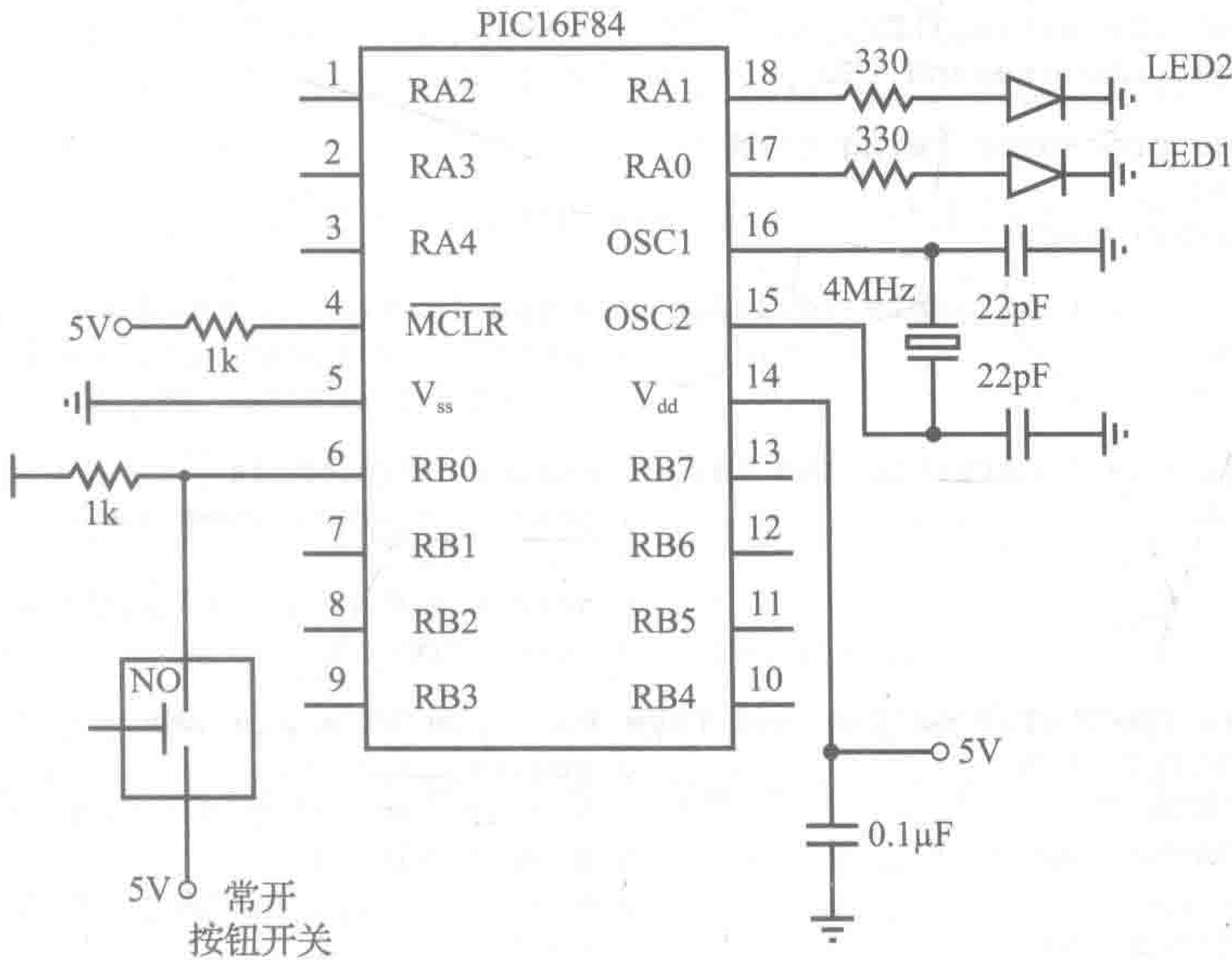
(SWAPF 读为 “swap nibbles in f”)

交换 f 的高和低半字节(半字节对应 4 位)，如果 d 等于 1 则结果存储于 f 中，如果 d 等于 0，则结果存储于累加器(W 寄存器)中。

例如，内存地址 0x10 中的数据为 0xAB，则 SWAPF 0x10, 0 将存储结果 0xBA 存储至 W 寄存器，SWAPF 0x10, 1 将使得地址 0x10 处的数据改为 0xBA。

例 7.2　汇编语言编程示例

本例编写了一个汇编语言程序，当按下一个按钮开关时 LED 灯打开，开关释放时，LED 灯熄灭。当开关按下、释放一定次数后，第二个 LED 将打开并维持点亮的状态。这个例子所需的硬件如下图所示：



假设按钮开关无抖动，这意味着当它被按下然后释放时仅产生一个脉冲信号(当开关被压下时，信号为高电平；开关释放后，信号变为低电平)。

下面的汇编语言代码将能够完成所需的要求。程序注释可以通过前面加分号(;)放在程序的任何位置，以便说明相关代码的含义。在生成十六进制机器代码时，汇编器会忽略注释信息。前四行的指令是汇编器指令，用于指定处理器并定义常量，它们将用在后面的代码中。在程序开始时定义常量(通过 equ 指令)是一个好习惯，因为在代码中常量名字比十六进制数更容易阅读和理解，而且可以方便地查找和事后修改。汇编语言常量(如地址和数值)用 0x 前缀表示成十六进制形式。

接下来的两行代码为 movlw 指令，将目标常数移至 W 寄存器中，然后转存到以 count 表示的内存地址中。目标值(0x05)将递减直到它达到 0x00。下面的代码初始化特殊功能寄存器 PORTA 和 TRISA，设置引脚 RA0 和 RA1 为输出用于驱动发光二极管。这些寄存器位于内存的不同段，因此使用 bsf 和 bcf 语句。程序中所有大写字母为由依赖处理器的包含文件(p16f84.inc)预定义的常数地址或数值。TRISA 寄存器的功能以后讨论。通过清除寄存器的位值，PORTA 引脚将配置为输出。

主循环使用 btfss(文件寄存器的位测试，如果已经复位则跳到下一条指令)和 btfsc(文件寄存器的位测试，如果已经复位则跳到下一条指令)指令语句来测试 RB0 引脚的信号状态。测试在由 goto 语句组成的循环中不断进行。begin 和 wait 是 goto 循环的语句标签。当开关按下时，状态变为高，btfss 语句将跳到 goto begin 指令，然后打

开 LED1。当开关释放时，RB0 引脚为低电平，btfsc 语句将跳到 goto wait 指令，使得 LED1 关闭。

当开关释放，LED1 关闭后，decfsz(递减文件寄存器，若 count 为 0 则跳到下一条指令)语句开始执行，decfsz 语句将 count 值减 1，若 count 值非 0，则执行 goto begin 语句，程序跳转至 begin 标号，重新从主循环的开始处执行程序，等待下一次按键动作。如果计数器的值为 0，decfsz 命令会跳过 goto 语句并打开 LED2。最后的 goto begin 语句将程序跳回主循环的开始处，并等待下一次按钮按下。

```
; bcount.asm (program file name)

; Program to turn on an LED every time a pushbutton switch is pressed and turn on
; a second LED once it has been pressed a specified number of times

; I/O:
; RB0: bounce-free pushbutton switch (1:pressed, 0:not pressed)
; RA0: count LED (first LED)
; RA1: target LED (second LED)

; Define the processor being used
list p=16f84
include <p16F84.inc>

; Define the count variable location and the initial count-down value
count equ 0x0c                        ; address of count-down variable
target equ 0x05                       ; number of presses required

; Initialize the counter to the target number of presses
movlw target                          ; move the count-down value into the
                                      ;  W register
movwf count                           ; move the W register into the count memory
                                      ;  location

; Initialize PORTA for output and make sure the LEDs are off
bcf      STATUS, RP0                  ; select bank 0
clrf     PORTA                        ; initialize all pin values to 0
bsf      STATUS, RP0                  ; select bank 1
clrf     TRISA                        ; designate all PORTA pins as outputs
bcf      STATUS, RP0                  ; select bank 0
; Main program loop
begin
        ; Wait for the pushbutton switch to be pressed
        btfss  PORTB, 0
        goto   begin

        ; Turn on the count LED1
        bsf    PORTA, 0

wait
        ; Wait for the pushbutton switch to be released
        btfsc  PORTB, 0
        goto   wait

        ; Turn off the count LED1
        bcf    PORTA, 0

        ; Decrement the press counter and check for 0
        decfsz count, 1
        goto begin     ; continue if count-down is still > 0

        ; Turn on the target LED2
        bsf            PORTA, 1

        goto begin     ; return to the beginning of the main loop

        end            ; end of instructions
```

课堂讨论项目 7.2 相减结果低于零

在例 7.2 中，decfsz 语句可以用于将数值从 5 减至 0。当从 0(0x00)值递减时，地址 count 中的数值将会变为 255(0xFF)，然后 254(0xFE)等。这一过程会对代码和 LED 显示造成什么影响？当计数器减为零时，需要添加什么代码才能使得程序继续正常运行呢？

第一次学习用汇编语言编写程序是非常困难的，并可能导致难以调试的错误。幸运的是，高级语言编译器能够在一个更友好的人机平台上对微控制器进行编程。在剩余的章节中，我们将主要讨论基于 PicBasic Pro 平台的编程语言。PicBasic Pro 的编译器可以从微工程实验室公司(microEngineering Labs，Inc)获得(参见网络链接 7.4，www.melabs.com)。比起汇编语言，PicBasic Pro 更容易学习和使用。该软件能够方便访问所有微控制器的功能，并提供了一组丰富的先进功能和特性以支持不同的应用开发。同时，PicBasic Pro 与美国 Parallax 公司的微控制器模块使用的 BASIC 语言几乎兼容，Parallax 公司邮票大小的微控制器模块是常用的 PIC 微控制器开发板。

PIC 和相关产品的附加信息可以参见网络链接 7.5。这个网站包含了许多对于制造商和其他用户来说有用的信息。

7.5 PicBasic Pro

PIC 程序可以写成名为 PicBasic Pro 的 BASIC 程序的形式。PicBasic Pro 编译器用于编译这些程序，生成对应的汇编语言，这些汇编代码进而转换成十六进制的机器代码通过编程器直接由 PC 下载到 PIC 的快闪 EEPROM 中。如果 PIC 已经按图 7-4 所示与必要的附加元器件正确连接，则上电后，PIC 中的程序即可开始执行。

本书不会阐述 PicBasic Pro 编程的各个细节。相反，我们将介绍一些基本的编程原理，进行简要的总结，并提供一些例子来对其加以说明。如果需要解决的问题是本章提供的内容所无法覆盖的，可以参见网上的相关资源(参见网络链接 7.6)。如果你没有使用过 VB、C、C++ 或 FORTRAN 中的任何一种编程语言，那么 7.5.1 节可能是有些难度的。即便如此，阅读完下面的例子，一些概念也应该变得更为清晰了。

7.5.1 PicBasic Pro 编程基础

我们从一个简单的例子开始来阐述 PicBasic Pro 的基本内容。本章的目标是编写一个程序，使该程序能够打开一个 LED 1s，然后关掉 1s，重复上述过程直至电路断电。上述程序的代码命名为 flash.bas。其所对应的硬件示意图如图 7-7 所示。引脚 RA2 用作输出，通过一个限流电阻输出电流给 LED。程序的前两行是注释，用以标注这个程序及其目的。**注释行**必须用撇号(')开始。在每一行中，程序右侧撇号后的内容都视为注释，编译器会忽略它。通过使用 Goto 命令，可以使得程序循环返回到所对应的标号位置 loop 处。High PORTA.2 命令会使引脚 RA2 变为高电平，从而使得 LED 打开。Pause 命令以给定的毫秒数延时(此例中，数值 1000 对应 1000ms 或 1s)执行下一行，Low PORTA.2 命令会使引脚 RA2 变为低电平，从而使得 LED 关闭。下一个 Pause 命令延时 1s，再去执行下一行代码。Goto loop 语句会跳转至控制程序的标号位置 loop 处，使得程序持续运行。End 语句表示程序执行结束。此例中，程序始终执行 loop 循环直至断电，End 语句永远无法执行，尽管如此，为了安全起见，应该通过 End 语句来终止程序。

```
' flash.bas
' Example program to flash an LED once every two seconds

loop: High PORTA.2                 ' turn on LED connected to pin RA2
      Pause 1000                   ' delay for one second (1000 ms)
```

```
Low PORTA.2          ' turn off LED connected to pin RA2
Pause 1000           ' delay for one second (1000 ms)

Goto loop            ' go back to label "loop" and repeat
                     '  indefinitely

End
```

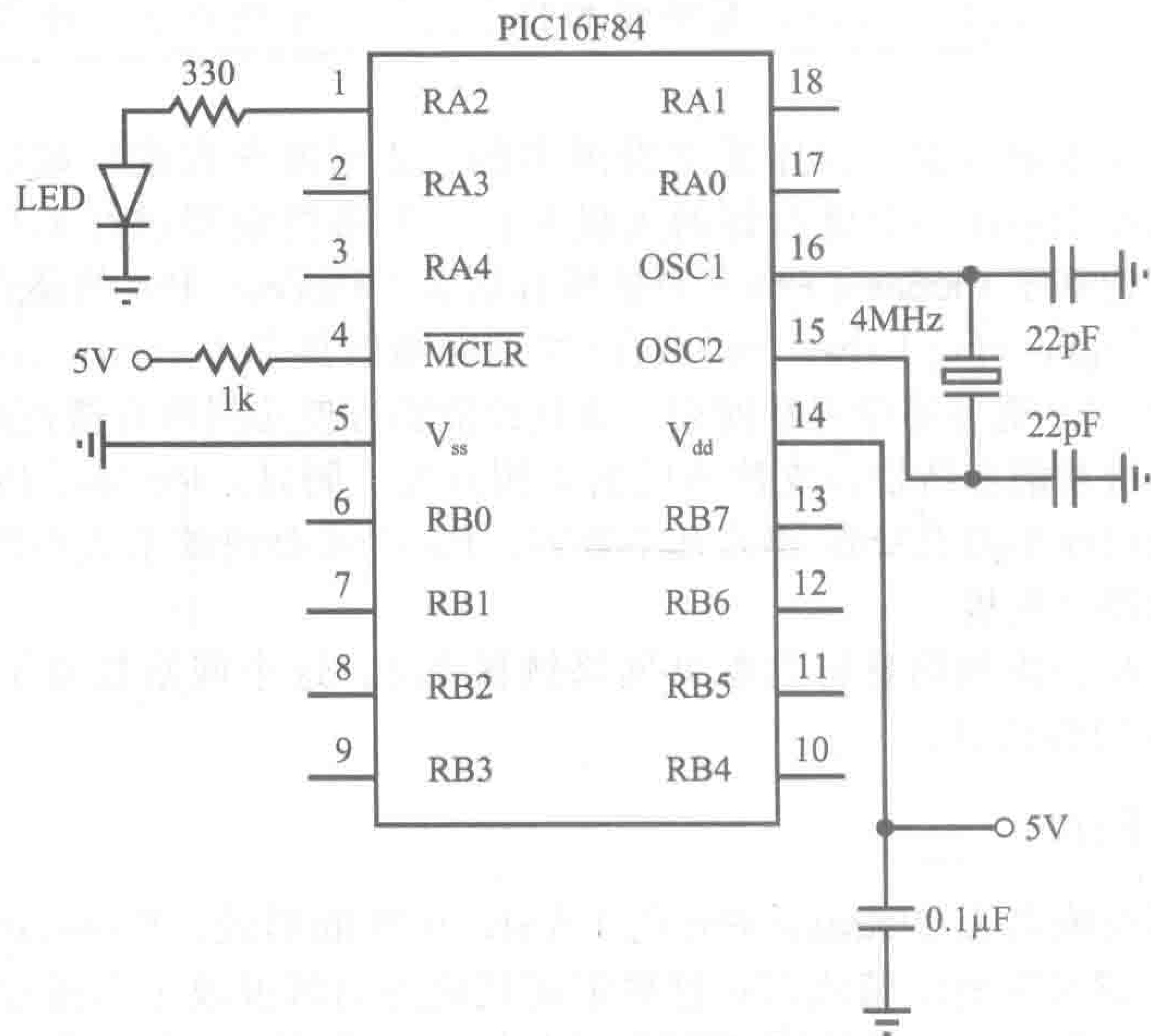


图 7-7　例子 flash. bas 的电路原理图

实验练习 9 讲述了如何实现像 flash. bas 这样的简单程序。这个练习包括 PIC 的接线、进入 PicBasic Pro 编程并编译程序，从计算机中下载执行代码到 PIC 的闪存中。

如案例 flash. bas 所述，PicBasic Pro 程序由一系列的程序语句组成，并一个接一个地顺序执行。程序员必须熟悉与 PicBasic Pro 相关的语法，相对于汇编语言来说，它更容易学习和调试。**注释**之前都有一个撇号，这个注释可以放置在程序的任何地方，以解释特定代码的目的和功能。由任何用户定义的标号、变量名或常量名通常称为**标识符**(如前面的例子中的 `loop`)。编程时可以使用任何以非数字开头的字母组合来表示标识符。同时，标识符必须不同于 PicBasic Pro 中保留的相关命令的符号(如关键字 `High` 和 `Low`)。标识符可以是任何长度的，但 PicBasic Pro 将忽略 32 个字符后的所有字符。PicBasic Pro 不区分字母的大小写，因此，任意大小写字母均可用作标识符，包括标号、变量、语句、寄存器或位引用。例如，在 PicBasic Pro 程序中，`High` 等同于 `HIGH` 或 `high`。然而，在编写代码时，最好使用一个统一的模式，这样可以使程序更具可读性。在本章给出的例子中，所有的变量和标号都采用小写的形式，而所有语句关键词的首字母大写，所有的寄存器和常数采用大写字母。

在某些应用程序中，可能需要保存一个数据供后续程序使用(如当按钮开关按下时，计数器每次都增加 1)。PicBasic Pro 允许创建相关变量，创建一个**变量**的语句为：

`name Var type`　　(7-1)

此处，`name` 标识符指变量名，`type` 描述了变量的类型和变量相应的数据大小。Type 可以是 **BIT**(用于存储一位信息，0 或 1)、**字节**(用于存储 8 位正整数，范围从 0～255，即 2^8-1)或 **WORD**(存储 2 字节 16 位正整数，范围从 0～65 535，即 $2^{16}-1$)。下面是一些变量声明和赋值语句的例子，可将值存储在变量中：

```
my_bit Var BIT
my_byte Var BYTE

my_bit = 0
my_byte = 187
```

Var 关键字也可以采用下面的句法来给 I/O 引脚或字节中的某一位命名：

name Var byte.bit (7-2)

例如，

```
led Var PORTB.0
lsb Var my_byte.0
```

用 led 表示 RB0 的状态，lsb 表示字节变量 my_byte 位 0 的数值。

另一种变量的形式是**数组**，它可以用来存储一组数据或向量。声明数组变量的语法为：

name Var type[size] (7-3)

其中，type 为储存方式(位、字节或字)；size 定义了数组单元的大小。数组指定的单元数据可以通过下面的语法存取或引用：

name[i] (7-4)

其中，i 代表被引用数组元素的索引；元素编号从 0 到 size-1。例如，Values Var byte[5]将会定义一个 5 字节的数组，该数组元素为 values[0]、values[1]、values[2]、values[3]、values[4]。

程序中的**常量**可以采用与变量同样的语法命名[见式(7-1)]，只要将 Var 关键字改为 Con 关键字并将 type 关键字改为常量的取值。当在程序中给定一个数值时，前缀 $ 用于表示十六进制数值，而前缀%用于表示二进制数值。如果没有前缀，则默认为十进制数值。例如，在下面的变量和常数定义语句中，所有的赋值语句都是相同的。

```
number Var BYTE
CONSTANT Con 23

number = 23
number = CONSTANT
number = %10111
number = $17
```

通常，常量和计算结果认为是无符号的(即 0 或正值)，但某些函数，如 Sin 或 Cos 使用不同的字节格式，其最高位为符号位，此时字节取值为-128～127。表 7-3 所示为一些 PicBasic Pro 常用的**数学运算符**和函数。其他运算符、函数及更多细节和例子可以在 PicBasic Pro 编译器手册中找到。

表 7-3 PicBasic Pro 的数学运算符和函数

数学运算符或函数	说明
A+B	A 和 B 之和
A−B	A−B
A*B	A 与 B 的乘积
A/B	A 除以 B
A//B	A 除以 B 的余数
A≪n	A 左移 n 位
A≫n	A 右移 n 位
COS A	A 的余弦函数值
A MAX B	A 与 B 的最大值
A MIN B	A 与 B 的最小值
SIN A	A 的正弦函数值
SQR A	A 的平方根
A&B	A 与 B 的逻辑与
A | B	A 与 B 的逻辑或
A^B	A 与 B 的异或
~A	A 按位取反

当对固定位长的变量(字节或字)进行取整运算时，必须首先检查截断和溢出错误。正如上面指出的，每个变量类型只能存储一定范围内的数据(如 0～255 的字节变量)。如果想将一个表达式赋值给一个变量，当表达式的值超过变量允许的最大值时就会导致错误，这就是所谓的**溢出**。**截断**发生于整数之间的除法运算中。如果一个整数除法的计算结果为分数，则除法的余数部分(小数部分)会被舍弃。有时截断的影响可以通过重新安排表达式的计算顺序使除法运算在关键

点执行，以达到最小化甚至避免。相关计算原理的详细例子会在实例 11 中进行介绍。

PicBasic Pro 语句集可用于读、写及处理所有信号的输入及输出。下面的语句可以指定 I/O 端口引脚：

```
port_name.bit
```
(7-5)

其中，port_name 为端口名称(PORTA 或 PORTB)；bit 为数据位的位置，取值范围为 0～7。例如，对引脚 RB1，可使用表达式 PORTB.1。当引脚配置为输出时，输出值(0 或 1)可以用一个简单的赋值语句来设置(如 PORTB.1=1)。当配置为输入时，引脚所对应的数值(0 或 1)可以直接引用来读取(如 value=PORTA.2)。所有端口的位信息可以使用赋值语句来一次性地设置，其形式如下：

```
port_name = constant
```
(7-6)

其中，constant 是一个 0～255 之间的数字，可以表示为二进制、十六进制或十进制。例如，PORTA＝%00010001 设置 PORTA.0 和 PORTA.4 位为 1，其他所有位为 0。因为 PORTA 中的 3 个最高有效位没有使用，所以高三位可以无需设定(即 PORTA＝%10001 的效果相同，而且更合适)。

PORTA 与 PORTB 位的 I/O 状态可以通过两个专用寄存器 **TRISA** 和 **TRISB** 来配置，前缀 TRIS 表示三态门控制，指出一个特定的引脚能否提供输入或输出。PIC16F84 上的 PORTA 与 PORTB 所对应的输入和输出电路如 7.8 节所述，其中详细说明了接口关系。当 TRIS 寄存器中的某位置 1 时，相应的端口位配置为输入，而当 TRIS 寄存器中的某位置 0 时，相应的端口位作为输出，如 TRISB＝%01 110 000 表示引脚 RB4、RB5、RB6 为输入，其余引脚为输出。上电时，TRIS 寄存器的所有位置 1(即 TRISA 和 TRISB 全部设置为 $FF 或%11 111 111)，所以在默认状态下，PORTA 和 PORTB 的所有引脚均为输入，对实际应用，需要在默认状态下在程序初始化时重新定义相应引脚的状态。

端口位访问语法[见(式 7-5)]同样可用于访问字节变量的单个位值，如下面的语句：

```
my_byte Var byte
my_array Var byte[10]
```

my_byte.3=1 将会将 my_byte 变量的第 3 位置 1，而 my_array[9].7= 0 会将 my_array 数组中最后一个元素的最高有效位清零。变量的所有位值可以通过**赋值语句**赋值：

```
variable = expression
```
(7-7)

例如：

```
my_byte = 231
my_array[2] = my_byte - 12
```

对于任何编程语言来说，两个重要功能都是执行逻辑比较和执行分支、循环、迭代。在 PicBasic Pro 中，逻辑功能主要是通过 If...Then...Else... 这样的语句来加以执行的，如果比较的结果是正确的，就会执行 Then 之后的语句；否则，就会执行 Else 之后的语句。表 7-4 所示为 PicBasic Pro 所支持的**逻辑比较运算符**。And、Or、Xor 和 Not 关键字通过括号组合产生逻辑比较所需的布尔表达式。例 7.3 和下面的其他例子说明了逻辑表达式的使用方法。

表 7-4　PicBasic Pro 逻辑比较运算符

运算符	说明
=或==	等于
<>或!=	不等于
<	小于
>	大于
<=	小于等于
>=	大于等于

例 7.3　PicBasic Pro 的布尔表达式

以下的 PicBasic Pro 语句用于开关连至引脚 RA0 的晶体管实现电机控制。当连接至引脚 RB0 的开关状态为高或连接至 RB1 的开关状态为低时，如果字节变量 count 的数值小于或等于 10，则打开电机：

```
If (((PORTB.0 == 1) OR (PORTB.1 == 0)) And (count <= 10)) Then
  High PORTA.0
```

最简单的循环形式通常是使用 goto 语句，如同前面例子 flash.bas 中所述。PicBasic Pro 还提供了 For…Next 和 While…Wend 这样的语句结构来表述循环和迭代过程。这些内容将通过剩余章节加以阐述。

表 7-5 列出了所有的 PicBasic Pro 语句及其说明。完整的语句解释和实例及相关的参数和变量可以参见 PicBasic Pro 编译器手册或是网站(见网络链接 7.6)。在表 7-5 中，关键字大写，后面的参数或变量的关键词是用小写来表示的。同样，在花括号({…})中的任何参数都是可选择的。这里所提及的所有特征和操作及表中的相关语句都是建立在表 7-2 所示的有限的汇编语言指令集的基础上的。PicBasic Pro 简化了汇编语言的细节，并提供了一个层次更高，更具用户友好性的语言。

表 7-5 PicBasic Pro 语句集合

语 句	解 释
@ assembly statement	插入一行汇编代码
ADCIN channel, var	读取片上模-数转换器的转换结果(如果有的话)
ASM…ENDASM	插入由一个或多个语句组成的汇编言语代码段
BRANCH index, [label1{, label2, …}]	根据 index 值计算跳转至哪一个语句标号
BRANCHL index, [label1{, label2, …}]	跳转至当前代码页之外的语句标号(对于 PIC，其程序 ROM 超过 2KB)
BUTTON pin, down_state, auto_repeat_delay, auto_repeat_rate, countdown_variable, action_state, label	读取引脚状态并进行消抖(使用延迟)和自动重复(如果在一个循环中使用)
CALL assembly_label	调用一个汇编语言子程序
CLEAR	所用变量清零
CLEARWDT	清零看门狗定时器
COUNT pin, period, var	在一段时间内某一引脚上出现的脉冲数
DATA {@ location,}{, constant2, …}	定义片内 EEPROM 的初始内容(和 EEPROM 语句一样)
DEBUG item1{, item2, …}	以固定的波特率将数据异步串行输出到一个引脚
DEBUGIN {timeout, label,}[item1{, item2, …}]	以固定的波特率将数据异步串行输入到一个引脚
DISABLE	禁用中断和调试处理
DISABLE DEBUG	禁用调试处理
DISABLE INTERRUPT	禁用中断处理
DTMFOUT pin, {on_ms, off_ms,} [tone1{, tone2, …}]	在引脚上产生触摸音
{EEPROM {@ location,} constant1{, constant2, …}}	定义片内 EEPROM 中的初始内容(和数据命令一样)
ENABLE	使用中断和调试处理
ENABLE DEBUG	使用调试处理
ENABLE INTERRUPT	使用中断处理
END	停止执行，进入低功耗模式
FOR count start TO end {STEP {—} inc}{body statements} NEXT {count}	当 count 以固定的增量从 start 到 end 时，重复执行循环语句体
FREQOUT pin, on_ms, freq1{, freq2}	在一个引脚上产生两个以上的频率
GOSUB label	调通指定标号处的 PicBasic 子程序
GOTO label	跳转至指定标号处继续执行
HIGH pin	引脚输出高电平
HSERIN {parity_label,} {time_out, label,} [item1{, item2,…}]	硬件异步串行输入(如果有硬件串口)
HSEROUT [item1{, item2, …}]	硬件异步串行输出(如果有硬件串口)
I2CREAD data_pin, clock_pin, control, { address,} [var1{, var2, …}]{, label}	从外部 I^2C 串行 EEPROM 芯片上读取若干字节
I2CWRITE data_pin, clock_pin, control, { address,} [var1{, var2, …}]{, label}	写若干字节到外部 I^2C 串行 EEPROM 芯片上
IF log_comp THEN label	有条件地跳到一个标号处

（续）

语句	解释
IF log_comp THEN true_statements ELSE false_statements ENDIF	条件执行语句
INPUT pin	设置引脚为输入
LCDIN {address,} [var1{, var2, …}]	读取 LCD(液晶屏)RAM 中的内容
LCDOUT item1{, item2, …}	在 LCD 上显示字符
{LET} var value	赋值语句(给变量赋值)
LOOKDOWN value, [const1 {, const2, …}], var	查找常量数据表的数据
LOOKDOWN2 value, {test} [value1{, value2, …}], var	查找常量或变量表的数据
LOOKUP index, [const1{, const2, …}], var	从表中获取常量
LOOKUP2 index, [value1{, value2, …}], var	从表中获取常量/变量的数值
LOW pin	设置引脚为输出
NAP period	在选择的时间内处理器断电
ON DEBUG GOTO label	如果允许调试，则在每条语句后的标号处执行 PicBasic 调试子程序
ON INTERRUPT GOTO label	当检测到一个中断时，执行标号处的 PicBasic 子程序
OUTPUT pin	设置引脚为输出
PAUSE period	延迟给定的毫秒数
PAUSEUS period	延迟给定的微秒数
{PEEK address, var}	从寄存器中读取字节
{POKE address, var}	往寄存器中写入字节
POT pin, scale, var	读取电位器电阻值或其他可变电阻器的电阻值，该电阻连接至 pin 上，并通过电容接地
PULSIN pin, state, var	测量 pin 上的脉冲宽度
PULSOUT pin, period	在 pin 上产生一个脉冲
PWM pin, duty, cycles	输出一个脉宽调制(PWM)脉冲序列
RANDOM var	生成一个伪随机数
RCTIME pin, state, var	测量 pin 上的脉冲宽度
READ address, var	从片内 EEPROM 中读取一个字节
READCODE address, var	从程序存储器中读取一个字
RESUME {label}	中断处理后继续执行
RETURN	返回至上一次 GOSUB 语句之后继续执行
REVERSE pin	使输出引脚变为输入引脚或输入引脚变为输出引脚
SERIN pin, mode, {timeout, label,} {[qual1, qual2, …],} {item1{, item2, …}}	异步串行输入(Basic Stamp1 型)
SERIN2 data_pin{\flow_pin}, mode, {parity_label,} {timeout, label,} [item1 {, item2, …}]	异步串行输入(Basic Stamp2 型)
SEROUT pin, mode, [item1{, item2, …}]	异步串行输出(Basic Stamp1 型)
SEROUT2 data_pin{\flow_pin}, mode, {pace,} {timeout, label,} [item1{, item2, …}]	异步串行输出(Basic Stamp2 型)
SHIFTIN data_pin, clock_pin, mode, [var1{\ bits1} {, var2{\bits2}, …}]	同步串行输入
SHIFTOUT data_pin, clock_pin, mode, [var1{\bits1} {, var2{\bits2}, …}]	同步串行输出
SLEEP period	在给定的时间(秒)内断电处理器
SOUND pin, [note1, duration1{, note2, duration2, …}]	在给定引脚上产生一个声音或白噪声信号
STOP	停止程序的执行
SWAP var1, var2	交换两个变量的值
TOGGLE pin	改变输出引脚的状态
WHILE logical_comp statements	条件为真时执行代码
WEND WRITE address, value	往 EEPROM 写入一个字节

（续）

语　句	解　释
WRITECODE address, value	在程序储存器写入一个字
XIN data_pin, zero_pin, {timeout, label,}[var1{, var2, …}]	在程序X-10型设备上接收数据
XOUT data_pin, zero_pin, [house_code1 \ key_code1{ \ repeat1}{, house_code2 \ key_code2{ \ repeat2, …}}]	发送数据到X-10型外部设备中

7.5.2 PicBasic编程示例

本节将提出一系列可以通过使用PIC16F84来解决的问题。示例主要说明了与PicBasic Pro相关的具体应用。在7.7节和7.8节中，将详细阐述如何将PIC与各种输入和输出设备相连接。在7.9节将给出一个条理清晰的设计过程，帮助你创建软件和相关硬件，以满足基于微控制器的机电控制系统的设计要求。

例7.4　PicBasic Pro替代例7.2中的汇编语言程序

在例7.2中，其目标是当用户按下开关时LED打开，当开关释放时LED熄灭。当开关按下并释放指定次数后，第二个LED将打开并保持点亮。例7.2提供了解决这个问题的汇编程序。其相应PicBasic Pro的解决方案如下所示。程序注释解释了各部分代码的功能。

While…Wend结构允许程序等待第一次开关按下或释放。While持续循环什么都不做，只是使开关保持某一状态。在大多数应用程序中，While和Wend之间会存在特定的循环语句它们在每次循环时执行，而这里不需要。

前缀my_作为my_count、my_button标识符的一部分，因为count和button是**保留标识符**。保留标识符是PicBasic Pro语句的关键字，也包括预定义的常量、数学和逻辑函数名，这些字符不能用作程序的标识符。

汇编语言和PicBasic Pro语言之间唯一的区别是计数的处理方式。PicBasic Pro语言可以往上加计数并检测何时达到目标值时。在汇编语言中，这是不容易做到的，因此用向下减计数来代替。另一个区别是PicBasic Pro简化了内存处理。在PicBasic Pro中不需要识别变量的地址和特定的内存段或通过累加器移动数据，PicBasic Pro会自行处理这些问题。

```
' bcount.bas
' Program to turn on an LED every time a pushbutton switch is pressed, and
' turn on a second LED once it has been pressed a specified number of times

' Define variables and constants
my_count     Var     BYTE     ' number of times switch has been pressed
TARGET       Con     5        ' number of switch presses required

' Define variable names for the I/O pins
my_button    Var     PORTB.0
led_count    Var     PORTA.0
led_target   Var     PORTA.1

' Initialize the counter and guarantee the LEDs are off
my_count = 0
Low led_count
Low led_target

begin:
    ' Wait for the switch to be pressed
    While (my_button == 0)      ' wait as long as switch is not pressed (0)
    Wend

    ' Turn on the count LED now that the switch has been pressed
    High led_count
```

```
        ' Wait for the switch to be released
        While (my_button == 1)      ' wait as long as switch is pressed (1)
        Wend

        ' Turn off the count LED and increment the counter now that the switch
        ' has been released
        Low led_count
        my_count = my_count + 1

        ' Check if the target has been reached; and if so, turn on the target LED
        If (my_count >= TARGET) Then
               High led_target
        Endif

    Goto begin
    End
```

如果对上述两个解决方案进行比较，你会发现 PicBasic Pro 代码更容易编写和理解。当需要解决更复杂的问题时，这一点将变得更明显。通过使用 PicBasic Pro 很容易做的事情却很难用汇编语言来加以完成，包括变量和数组的管理、带有复杂计算的赋值语句、逻辑比较表达式、迭代、中断、暂停及其他特殊功能。

尽管如此，使用 PicBasic Pro 的一个缺点的是它会消耗更多的程序 EEPROM 空间。对于这个例子来说，尽管功能相同，汇编语言需要 17 个字的程序内存，而 PicBasic Pro 则需要 39 个字的内存。这是使用高级语言的常见结果。幸运的是，廉价的 PIC16F84 有多达 1024 个字的存储空间，这已能满足相对复杂的程序需求。此外，许多其他 PIC 芯片有更大的存储空间，而且，微控制器的发展趋势是持续下降的成本和继续上升的存储能力。

课堂讨论项目 7.3　比较 PicBasic Pro 和汇编语言

比较例 7.2 所示的汇编语言代码和例 7.4 所示的 PicBasic Pro 代码。说明两个程序的不同之处。

课堂讨论项目 7.4　汇编语言语句的 PicBasic Pro 实现

根据例 7.1 所示的汇编语言语句编写出相应的 PicBasic Pro 代码。

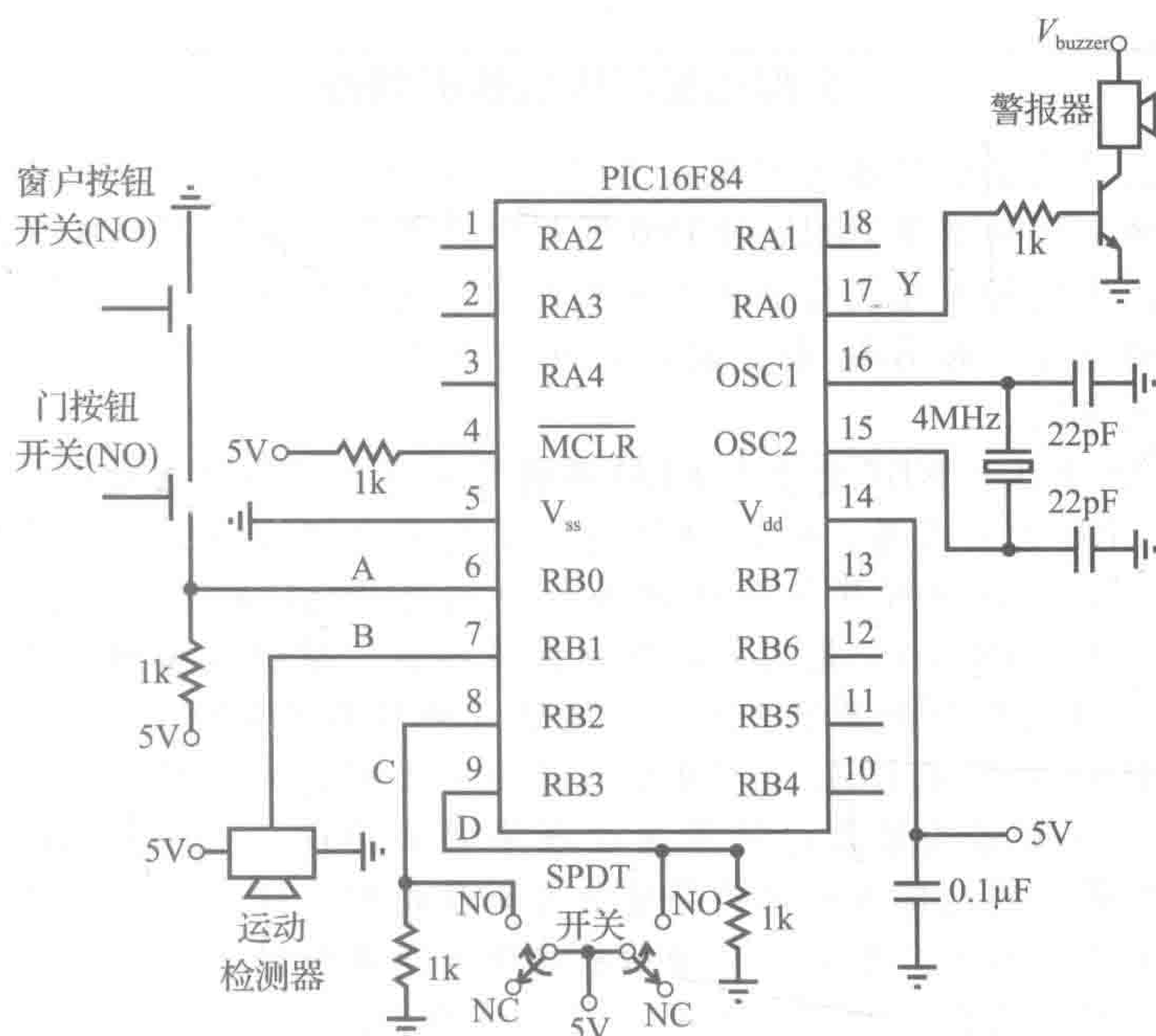
例 7.5　安全系统的 PicBasic Pro 程序

这个例子展示了一个在 6.6 节描述的用来控制安全系统的 PicBasic Pro 程序。相关细节请参见 6.6 节。下列的程序注释会帮助你理解相关代码的功能。注意制表符、空格、空行、括号、注释和变量定义的使用，这些规范的格式使得程序更具可读性。如果所有这些规范化的特征和定义被排除在外，程序仍然会继续运行，但对读者来说就不那么容易理解了。硬件原理图如代码后面的附图所示。

门、窗传感器通常假定为常开开关结构，当门窗关闭时，传感器开关也闭合。两个传感器串联在一起并通过上拉电阻与 5V 电源相连，只要有一个开关打开，信号 A 就为高电平，只有两个开关同时闭合时，信号 A 才为低电平，这种结构称之为**线与**结构，因为它通过硬线连接实现了逻辑与门的功能。

运动探测器检测到运动时会使信号 B 变为高电平。单刀双掷开关用于设置两位编码输入 C 和 D。如图中所示，开关全部处于常闭位置，因此，CD 编码为 00。当信号 Y 为高电平时，警报器发声，晶体管正向偏置。当 Y 为高时，1kΩ 的基极电阻会将输出电流限制在 5mA(5V/1kΩ)左右，该数值符合 PORTA 端口输出电流规范(7.8.2 节中列出的 20mA)。

```
' security.bas
' PicBasic Pro program to perform the control functions of the security
' system presented in Section 6.6
' Define variables for I/O port pins
door_or_window      Var      PORTB.0      ' signal A
motion              Var      PORTB.1      ' signal B
c                   Var      PORTB.2      ' signal C
d                   Var      PORTB.3      ' signal D
alarm               Var      PORTA.0      ' signal Y
' Define constants for use in IF comparisons
OPEN                Con      1      ' to indicate that a door OR window is open
DETECTED            Con      1      ' to indicate that motion is detected
' Make sure the alarm is off to begin with
Low alarm
' Main polling loop
always:
       If ((c == 0) And (d == 1)) Then       ' operating state 1 (occupants
                                             ' sleeping)
              If (door_or_window == OPEN) Then
                     High alarm
              Else
                     Low alarm
              Endif
     Else
     If ((c == 1) And (d == 0)) Then   ' operating state 2 (occupants away)
            If((door_or_window == OPEN) Or (motion == DETECTED)) Then
                   High alarm
            Else
                   Low alarm
            Endif
     Else                                ' operating state 3 or NA (alarm
                                         ' disabled)
            Low alarm
     Endif
   Endif
Goto always                              ' continue to poll the inputs
End
```



如果所有变量和常量的定义、格式和注释被都删除掉，程序仍然会正常运行，但代码将变得难以理解，此时的代码如下所示：

```
Low PORTA.0
always: If PORTB.2==0 And PORTB.3==1 Then
If PORTB.0==1 Then
High PORTA.0
Else
Low PORTA.0
Endif
Else
If PORTB.2==1 And PORTB.3==0 Then
If PORTB.0==1 Or PORTB.1==1 Then
High PORTA.0
Else
Low PORTA.0
Endif
Else
Low PORTA.0
Endif
Endif
Goto always
End
```

不规范的代码格式没有益处。规范的代码格式并不会影响编译器编译后的机器代码大小。

课堂讨论项目 7.5　**多门窗安全系统**

如果程序中有超过一个门和一个窗户时，怎么修改硬件设计？你会修改所对应的软件部分吗？

课堂讨论项目 7.6　**PIC 与逻辑门**

在例 7.5 中，PIC 可以代替 6.6 节中所提出的逻辑门方案。每种方法的利弊是什么？你认为通常哪种实现是最好的选择？对此例也是如此吗？

例 7.6　**图形化显示电位器的数值**

这个例子给出了采集电位器电阻值的程序，同时采用一系列 LED 以二进制的方式显示变换后的电阻值。代码使用 PicBasic Pro 语句中的 `Pot`，它可以间接采集电位器或其他可变电阻的数值。实例的程序代码 pot.bas 和必要的硬件如下图所示。

电位器的滑动端与引脚 RA3 相连接，而电位器的另一端与电容串联接地。注意电位器的第 3 个引脚未连线。

PORTB 端口的 RB0～RB7 连接至 LED 并通过限流电阻串联接地，任何一个引脚为高电平时，相应的 LED 就会点亮。8 个 LED 显示了对应当前位置的电位器的二进制数，显示值的范围从 0～255。这个程序使用赋值语句 `PORTB=value` 来更新显示的数值，此处 `value` 是一个字节变量(8 位)，是当前电位器的采样值。赋值语句驱动 PORTB 端口的输出，如 RB0 代表采样电阻值的最低有效位，RB7 代表最高有效位。

连接至引脚 RA2 的测试 LED 用来表示程序是否正在运行。当程序正在运行时，测试 LED 闪烁。这是一种很好的做法，特别是在程序调试阶段。闪烁的 LED 表明 PIC 已上电、必要的外部元器件已连接且程序已经装载并正确运行。这是一个简单的例子，程序逻辑和执行顺序不太可能出错。然而，复杂的程序包含复杂的逻辑、分支、循环和中断，可能会导致程序意外挂起或提前终止，尤其是在完成调试之前。测试 LED 不闪烁时则意味

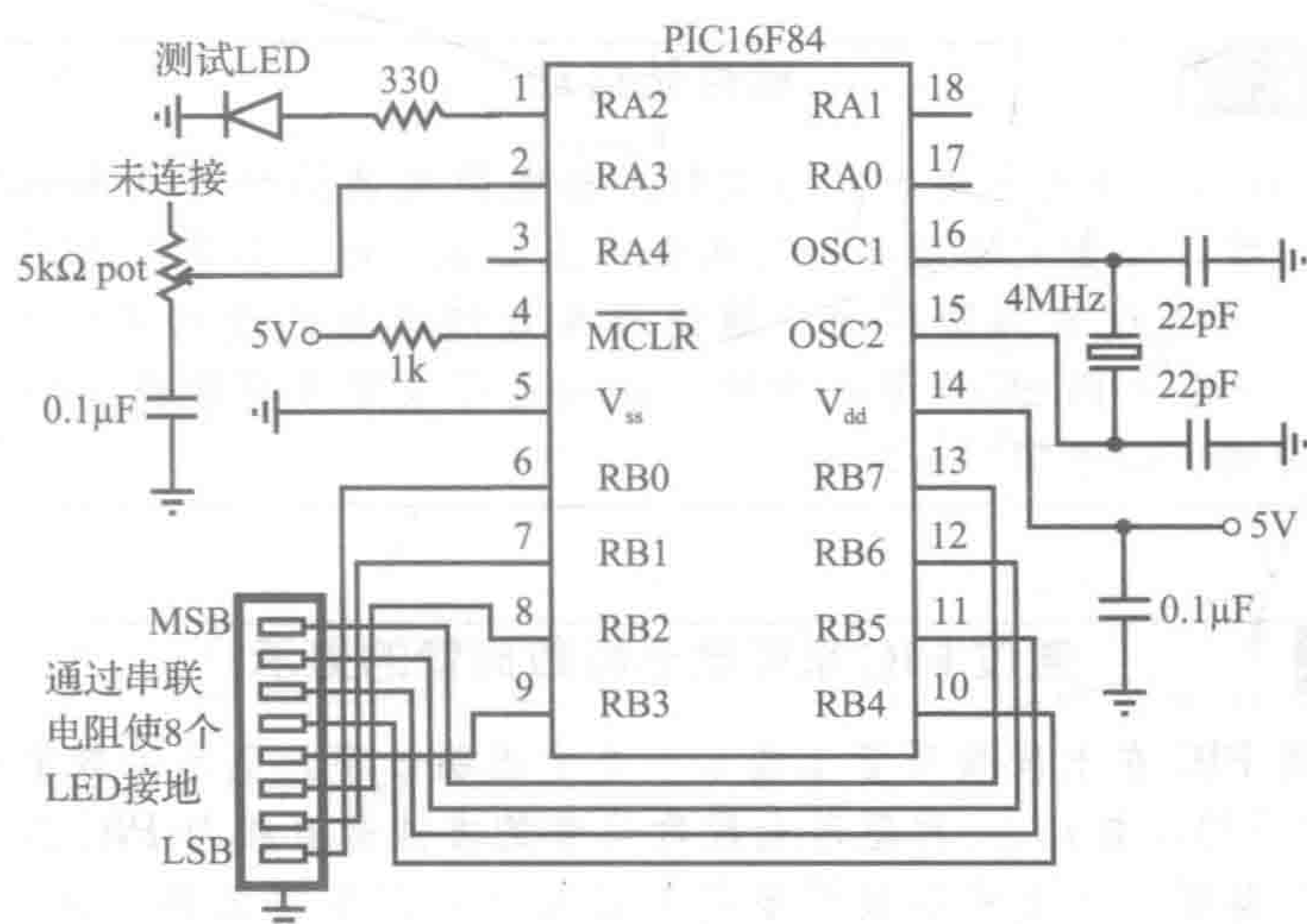
着程序出现了问题。

Pot 句法为：

```
Pot pin, scale, var
```

其中，pin 为输入引脚标识符；seale 为 1～255 间的数值用于调节电位器和串联电容的最大时间常数；var 为字节变量名用于存储 Pot 语句的返回值。如何确定合适的 scale 值，请参照 PicBasic Pro 手册。当电位器处于最小电阻位置时，var 值最小(0Ω，var=0)，当电阻最大时，var 值最大(如果 scale 选择适当，var=255)，对 5kΩ 的电位器，0.1μF 的串联电容，合适的 scale 值为 200。

在此例中，TRISB=%00 000 000 赋值语句表示 PORTB 端口所有引脚均配置为输出，因为采样后的电位器值直接由赋值语句 PORTB=value 输出显示。在前面的例子中，采用了 High 和 Low 语句，TRIS 寄存器无须明确赋值，因为这两条语句自身将自动设置相应的引脚为输出。PORTB=value 根据 value 相应的位值设置所有 PORTB 引脚的输出状态。




```
' pot.bas
' Graphically displays the scaled resistance of a potentiometer using a set of
'  LEDs corresponding to a binary number ranging from 0 to 255.
' Define variables, pin assignments, and constants
value    Var    BYTE          ' define an 8 bit (byte) variable capable of
                              '  storing numbers between 0 and 255
test_led Var    PORTA.2       ' pin to which a test LED is attached (RA2)
pot_pin  Var    PORTA.3       ' pin to which the potentiometer and series
                              '  capacitor are attached (RA3)
SCALE    Con    200           ' value for Pot statement scale factor
' Define the input/output status of the I/O pins
TRISB = %00000000          ' designate all PORTB pins as outputs
loop:
      High test_led              ' turn on the test LED
      Pot pot_pin, SCALE, value  ' read the potentiometer value
      PORTB = value              ' display the binary value graphically
                                 ' with the 8 PORTB LEDs (RB0 through RB7)
      Pause 100                  ' wait one tenth of a second
      Low test_led               ' turn off the test LED as an indication
                                 ' that the program and loop are running
      Pause 100                  ' wait one tenth of a second
Goto loop    ' continue to sample and display the potentiometer value and blink
             ' the test LED
End
```

这个例子展示了如何应用特殊的 PicBasic Pro 语句 `Pot` 来采样电阻值，PicBasic Pro 还提供了其他高级语句(如 Button、Freqout、Lcdout、Lookdown、Lookup、Pwm、Serin、Serout 和 Sound)，使用这些语言只需几行代码，即可实现很多复杂的功能。视频演示 7.1 展示了这个例子的硬件和软件，8 个 LED 提供了旋钮(电位器)旋转时角位移的变化。

课堂讨论项目 7.7 端口是如何工作的

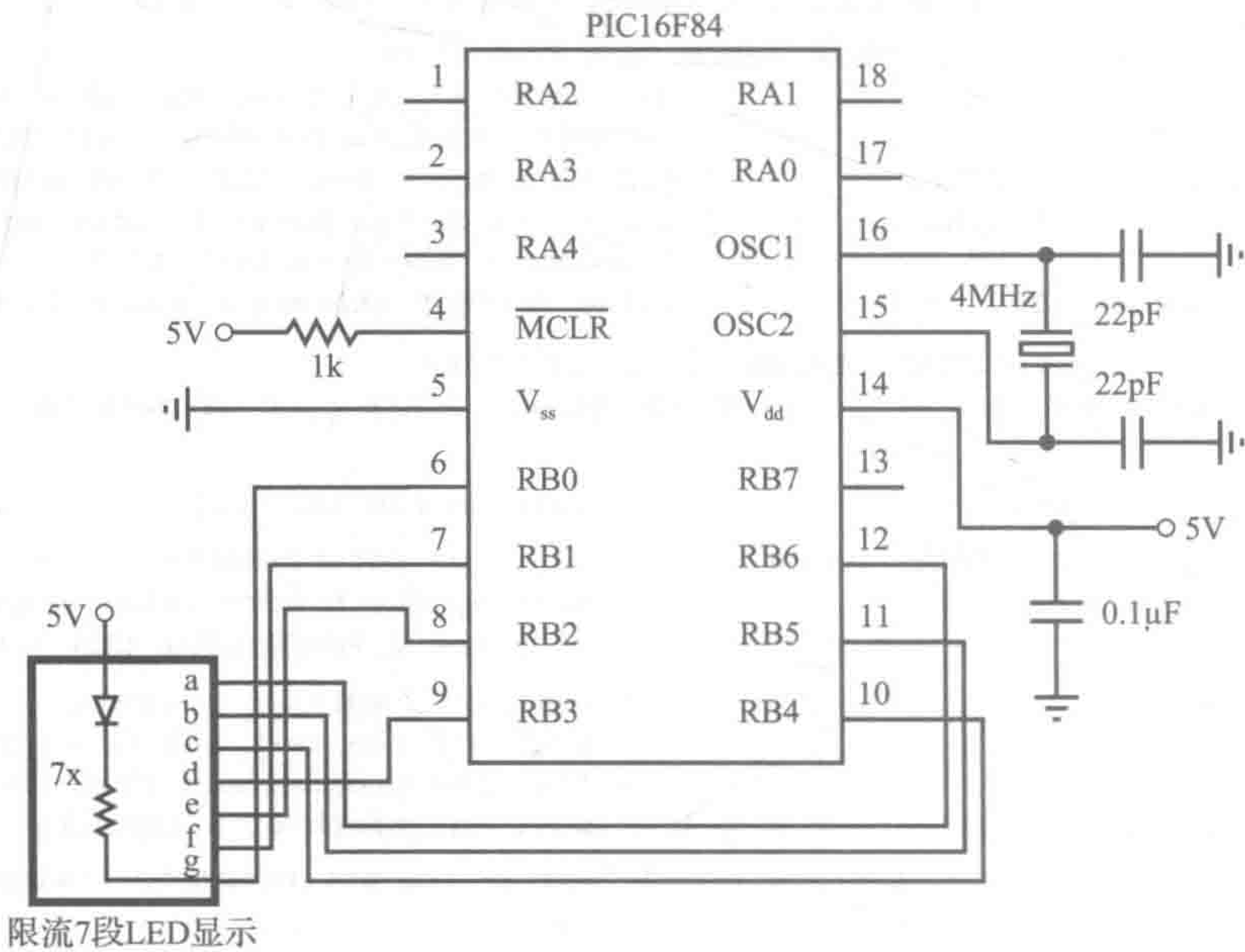
例 7.6 中 PicBasic Pro 语句 `Pot` 使用 I/O 端口来测量电位器的电阻。`Pot` 能够有效地将模拟电阻值转换为数字，其功能类似于 A-D 转换器。你认为 PicBasic Pro 是如何实现该功能的？(**提示：考虑 RC 电路的阶跃响应和使用同一个引脚先作为输出然后作为输入。**)

课堂讨论项目 7.8 软件防抖动

在 6.10.1 节给出了如何使用与非门或触发器电路来消除单刀双掷开关的抖动。这是所谓的**硬件解决方案**，因为它需要额外的元器件连接在一起。如果在 PIC 中设计一个开关用来输入数据，则可通过软件防抖动。假设开关通过单根线连接至 PIC，编制 PicBasic Pro 程序实现防抖。注意 PicBasic Pro 中的 `Button` 可以用来实现此功能，但此处希望你采用其他更为基础的语句来实现此功能。

设计实例 7.1 通过 PIC 来驱动七段数码管的显示

此例通过使用 PIC 在七段数码管上显示一个十进制数字。显示的数值可以是计算或计数结果(如开关按下的次数)。一种驱动七段数码管的方法是直接与 PIC 的 7 个输出引脚相连。这将涉及软件解码以确定哪些段需要打开或关闭，以显示正确的数字。如果 PORTB 引脚连接至七段数码管相应的段标号(段标号如图中七段数码管右侧所示)上，并通过一组限流电阻接至 5V 电源，下列程序的初始化代码必须出现在程序的顶部：



```
' Declare variables
number   var   BYTE    ' digit to be displayed (value assumed to be from 0
                       ' to 9)
pins  var  BYTE[10]   ' an array of 10 bytes used to store the 7-segment
                      ' display codes for each digit

' Initialize I/O pins
TRISB = %00000000     ' designate all PORTB pins as outputs (although, pin 7 is
                      ' not used)

' Segment codes for each digit where a 0 implies the segment is on and a 1 implies
' it is off, because the PIC sinks current from the LED display
'          %gfedcba          display
pins[0] = %1000000           ' 0
pins[1] = %1111001           ' 1
pins[2] = %0100100           ' 2
pins[3] = %0110000           ' 3
pins[4] = %0011001           ' 4
pins[5] = %0010010           ' 5
pins[6] = %0000011           ' 6
pins[7] = %1111000           ' 7
pins[8] = %0000000           ' 8
pins[9] = %0011000           ' 9
```

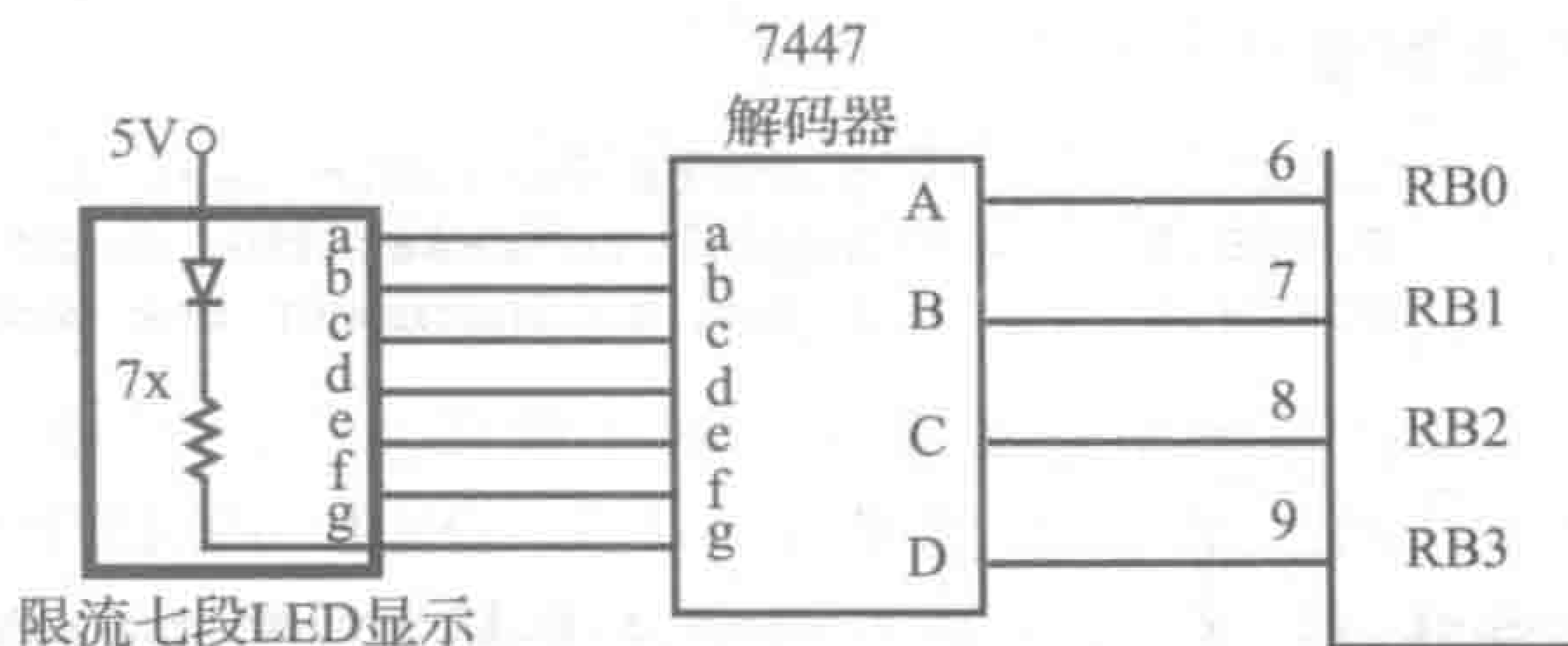
剩余的代码可能包含一个轮询循环以周期地更新数字显示，可以使用子程序来完成这一任务。**子程序**是执行特定功能的一个代码块，通常子程序在程序中的多个位置调用执行。应用前面声明的字节变量 number，下面的子程序可以用于显示变量 number 中的值。

```
' Subroutine to display a digit on a 7-segment LED display. The value of the
' digit must be stored in a byte variable called "number." The value is assumed
' to be less than 10; otherwise, all segments are turned off to indicate an error.
display_digit:
      If (number < 10) Then
            PORTB = pins[number]        ' display the digit
      Else
            PORTB = %1111111            ' turn off all 7 segments
      Endif
Return
```

可以在程序的不同位置通过赋值和调用上面的子程序显示数字。如下面的语句将显示数字 8。

```
number = 8
Gosub display_digit
```

上面给出的解决方案需要 7 个输出引脚，由于 PIC16F84 总共只有 13 个 I/O 引脚，这限制了其他 I/O 附加功能的实现。一个替代设计方案是使用七段译码器集成电路(如 7447)，此时仅需 4 个 I/O 引脚，如下图所示：



此时引脚阵列不是必需的，而且只有引脚 RB0～RB3 需要初始化为输出。子程序可以改写为：

```
display_digit:
        If (number < 10) Then
                PORTB = (PORTB & $F0) | number        ' display the digit
        Else
                PORTB = (PORTB & $F0) | $F            ' turn off all segments
        Endif
Return
```

PORTB 的赋值语句应用**逻辑掩码**来维持 PORTB 的高四位状态不变，这些位可能由程序的其他语句独立设置以完成其他功能，而 PORTB 的低四位则用来根据二进制数值驱动七段数码管显示。逻辑掩码是一个位串，用来防止选定的位值发生改变。按位与(&)和或(|)操作符辅助完成掩码操作。在程序中 PORTB& $F0 维持高四位不变而将低四位清零，例如，若 PORTB 的当前值为%11011001，则 PORTB & $F0 的结果如下：

```
%11011001        (PORTB)
    &
%11110000        ($F0)
    =
%11010000        (PORTB & $F0)
```

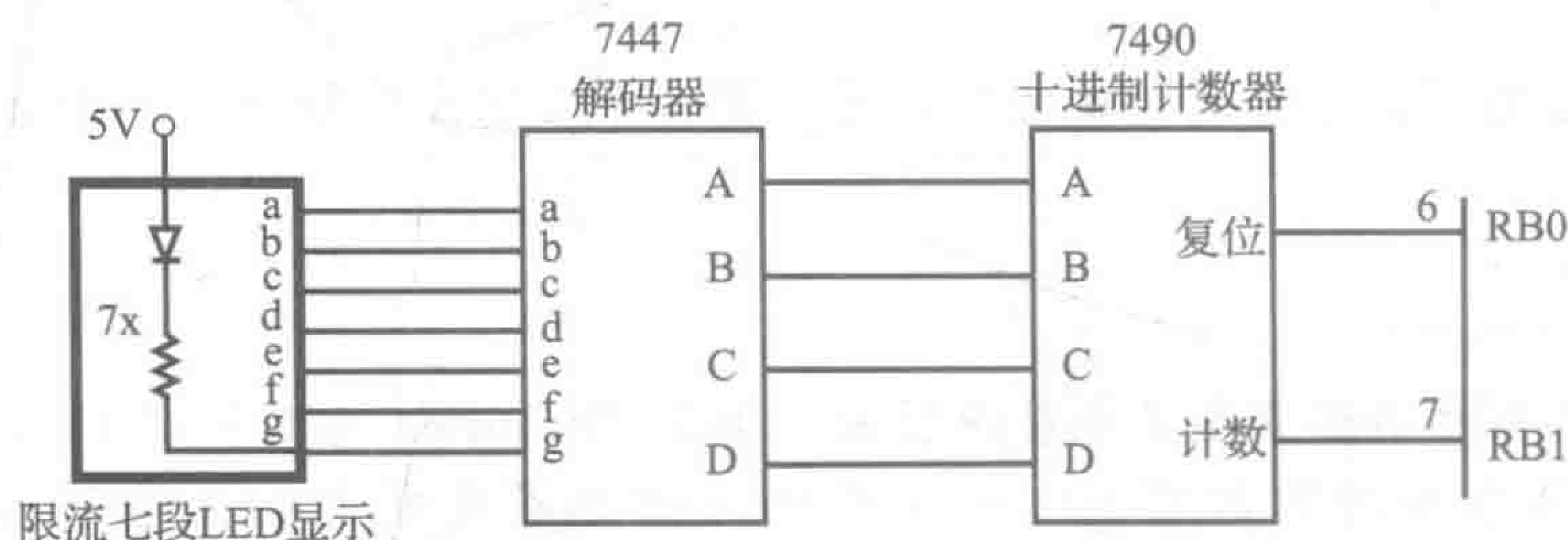
将上述结果与 number 相或，低四位将变为 number 对应的二进制值，例如，若 number 的当前值为 7(%0111)，则(PORTB & $F0) | number 的结果如下：

```
%11010000        (PORTB & $F0)
    |
%00000111        (number)
    =
%11010111        ((PORTB & $F0) | number)
```

显而易见，PORTB 的高四位维持不变，而低四位变为 number 值。

从句 Else 中的$ F(15)是译码集成电路关闭数码管的所有七段所需的输入值。

如果在你的设计中可用 I/O 引脚少于 4 个，但仍希望能够显示数字，另一个选择是使用一个具有复位和计数输入的 7490 十进制计数器芯片。复位输入假设为正逻辑，当复位线为高电平时，计数器复位，输出等于 0。计数器输入是边沿触发的，在这个例子中其触发方向并不重要。此时只需要两个 PIC I/O 引脚即可完成上述驱动过程，硬件接线图如下：



此例中，只有引脚 RB0 和 RB1 需要初始化为输出，此外需要声明一个新的变量(i)用于显示子程序。两个引脚配置代码如下：

```
i          Var      BYTE         ' counter variable used in FOR loop
reset      Var      PORTB.0      ' signal to reset the counter to 0
count      Var      PORTB.1      ' signal to increment the counter by 1
```

子例程将改写为

```
display_digit:
        Pulsout reset, 1            ' send a full pulse to reset the counter
                                    ' to zero
        If (number < 10) Then
        ' Increment the counter "number" times to display the appropriate
        ' digit
```

```
        For i = 1 To number
                Pulsout count, 1    ' send a full pulse to increment the
                                    ' counter
        Next i
    Else
        ' Increment the counter 15 times to clear the display (all segments
        ' off)
        For i = 1 To 15
                Pulsout count, 1    ' send a full pulse to increment the
                                    ' counter
        Next i
    Endif
Return
```

在子程序中，PicBasic Pro 的语句 Pulsout 用于输出脉冲至两个控制引脚，语法如下：

```
Pulsout pin, period
```

其中，pin 为引脚标识符(如 PORTB.0)；period 为脉冲宽度，数量级为微秒级。代码中脉冲宽度为 10μs。

此例中，最后两个方案需要额外的元器件(译码器和计数器 IC)。如果物理尺寸没有限制，那么不使用额外的 PIC16F84 或具有更多 I/O 引脚的 PIC 可以使花费最少，则后一种选择可能更有吸引力。

课堂讨论项目 7.9　　**快速计数**

在设计实例 7.1 的第三个方案中，计数器加适当的次数来完成所需的十进制值显示。你认为这个计数过程能在显示屏上检测到吗？为什么能或为什么不能？

实验练习 10 显示了如何连接元器件和编写软件来完成设计实例 7.1 中提供的一些功能。练习将十进制显示功能拓展为可以显示所有的十六进制数字。视频演示 7.2 和 7.3 给出了两种不同的设计练习。第一个解决方案是使用 555 定时器电路与数据锁存器来防止按钮开关输入信号的抖动，第二个解决方案则是在软件中使用延迟来处理开关抖动。

7.6　使用中断

在设计例 7.9 中所示的安全系统程序时采用了一种称之为**轮询**的方法，该方法是在一个循环中不断检查传感器的输入并更新相应的输出，程序流很容易理解，因为所有的处理都发生在主程序循环中。只要微控制器通电，循环就会一直重复。对于更复杂的应用程序，轮询可能是不合适的，其原因在于可能要花太多的时间来执行循环。在很长一段循环中，输入检测的次数可能不足。一个可选的方法是使用中断。在一个中断驱动程序中，一些输入与特定的中断输入引脚相连。当一个或多个输入发生变化时，微控制器暂时中止正常程序的执行，转而执行一个称之为**中断服务子程序**或函数。中断服务程序结束后，程序控制权重新回到主程序发生中断的位置。因为轮询更易实现，所以只要轮询速度足够快，就应优先选择使用轮询方式。

为了检测中断，必须对 PIC 上的两个特定寄存器正确地进行初始化操作。这些寄存器包括：选项寄存器(**OPTION_REG**)和中断控制寄存器(**INTCON**)。第一个寄存器(OPTION_REG)的位定义如下，注意最右边为最低有效位，表示为 b_0，最左边为最高有效位，表示为 b_7。

$$OPTION_REG = \%b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0$$

第 7 位：$\overline{\text{RBPU}}$：PORTB 上拉使能位
　1=PORTB 上拉禁用
　0=PORTB 上拉使能
第 6 位：中断边沿选择位
　1=RB0 引脚信号上升沿中断
　0=RB0 引脚信号下降沿中断
第 5 位：T0CS：TMR0 时钟源选择位
　1=时钟源来自 RA4 引脚的外部时钟信号
　0=内部指令周期时钟(CLKOUT)
第 4 位：T0SE：TMR0 源边沿选择
　1=RA4 引脚由高到低变化时加 1
　0=RA4 引脚由低到高变化时加 1
第 3 位：PSA：预分频器赋值位
　1=预分频器配置给看门狗定时器(WDT)
　0=预分频器配置给 TMR0

第 2、1 位和 0：这 3 个位值用于定义定时器的预分频比例

数值	TMR0 的比例	WDT 的比例
000	1：2	1：1
001	1：4	1：2
010	1：8	1：4
011	1：16	1：8
100	1：32	1：16
101	1：64	1：32
110	1：128	1：64
111	1：256	1：128

在下面的 onint.bas 例子中，OPTION_REG 设置为 $7F，即%01111111。设置位 7 为低电平状态会使 PORTB 处于上拉状态，设置位 6 为 1 使得 RB0 引脚信号在上升沿产生中断。当使能上拉后，PORTB 输入会保持高电平状态直至其引脚被外部输入电路下拉至地(如 RB0 通过开关与地相连)。只有当使用特殊功能定时器时，位 0 到位 5 才需要重点关注。

第二个寄存器(INTCON)的每一位定义如下：

第 7 位：GIE：全局中断使能位
　1=使能所有未屏蔽中断
　0=禁用所有中断
第 6 位：EEIE：EE 写完成中断使能位
　1=使能 EE 写完成中断
　0=禁用 EE 写完成中断
第 5 位：T0IE：TMR0 溢出中断使能位
　1=使能 TMR0 中断
　0=禁用 TMR0 中断
第 4 位：INTE：RB0 中断使能位
　1=使能 RB0/INT 中断
　0=禁用 RB0/INT 中断
第 3 位：RBIE：RB 端口改变中断使能位(RB4～RB7)
　1=使能 RB 端口改变中断
　0=禁用 RB 端口改变中断
第 2 位：T0IF：TMR0 溢出中断标志位
　1=TMR0 溢出(必须通过软件清除)
　0=TMR0 未溢出
第 1 位：INTF：RB0 中断标志位
　1=发生 RB0 中断
　0=未发生 RB0 中断
第 0 位：RBIF：RB 端口改变中断标志位

1=在 RB4～RB7 中信号至少一个已经改变(必须通过软件清除)
0=在 RB4～RB7 中没有信号改变状态

在下面的 onint. bas 例子中，INTCON 设置为 $90，即为%100 100 00。为了使能中断，位 7 必须置为 1。当位 4 设置为 1 时，可以用于检查 RB0 引脚的中断状态。位 0 和位 1 用来表示程序执行期间的中断状态。如果需要多个中断信号，位 3 将设置为 1，这样会使能 RB4～RB7 中断。在这种情况下，INTCON 将设置为 $88(%100 010 00)。要检查中断 RB0 和 RB4～RB7，INTCON 应设置为 $98(%100 110 00)。PORTA 没有中断功能，PORTB 只有 RB0 和 RB4～RB7 具有中断能力。位 2、5、6 用于更高级的功能，在本例中未使用。

下面名为 onint. bas 的简单例子说明了中断的使用方法，相应的原理图如图 7-8 所示。程序的功能将在接下来的段落中详细描述。

```
' onint.bas

' This program turns on an LED and waits for an interrupt on PORTB.0. When RB0
' changes state, the program turns the LED off for 0.5 seconds and then resumes
' normal execution.

led    var    PORTB.7               ' designate pin RB7 as "led"

       OPTION_REG = $7F             ' enable PORTB pull-ups and detect positive
                                    '  edges on interrupt
       On Interrupt Goto myint      ' define interrupt service routine location
       INTCON = $90                 ' enable interrupts on pin RB0
' Turn LED on and loop until there is an interrupt
loop:  High led
       Goto loop

' Interrupt handling routine
Disable                             ' disable interrupts until the Enable
                                    ' statement appears
myint:  Low led                     ' turn LED off
        Pause 500                   ' wait 0.5 seconds
        INTCON.1 = 0                ' clear interrupt flag
        Resume                      ' return to main program
Enable                              ' allow interrupts again

End                                 ' end of program
```

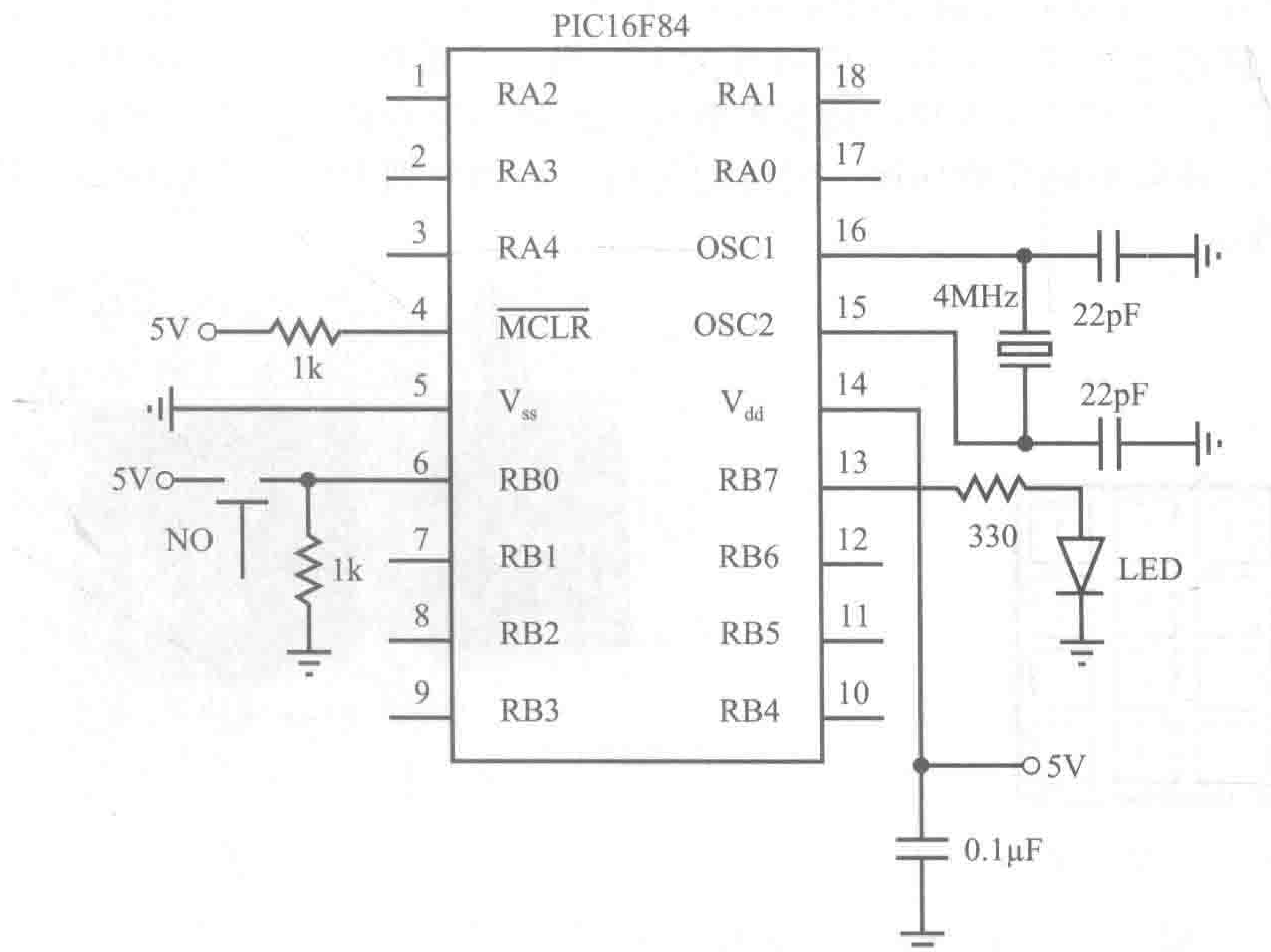


图 7-8　中断示例原理图

外部中断发生后，Onint.bas 程序打开与 RB7 引脚相连的 LED。与 RB0 相连的一个常开按钮开关用于提供中断信号源。当信号从低变为高时，执行中断程序，导致 LED 熄灭 0.5s，然后程序回到主循环，使得 LED 再次打开。

程序的第一个有效语句行创建了指向 PORTB.7 的变量 `led`。下一行，OPTION_REG 设置为 $7F(或%01 111 111)以使能 PORTB 上拉，配置 RB0 引脚信号上升沿触发中断。PicBasic Pro 语句 `On Interrupt Goto` 给出了在中断发生时，程序跳转时语句标号 `myint`。INTCON 寄存器的值设置为 $90(或%100 100 00)，并且使能 RB0 中断。

随后两行以标号 `loop` 开始的语句使程序持续循环运行以等待中断的发生。在这个循环过程中，与引脚 RB7 相连的 LED 保持点亮状态。该循环称为**无限循环**，因为只要没有中断发生，它就连续运行。值得注意的是，为了执行中断，在标号和 `Goto` 语句间必须有一个有效语句(如 `High led`)，因为 PicBasic Pro 仅在一条语句执行完成后才会检查中断状态。

程序的最后一部分为中断服务程序。`Disable` 命令必须在中断服务程序标号之前，`Enable` 语句必须在 `Resume` 语句之后以防止在返回主程序之前检查中断。当在引脚 RB0 处发生中断后，程序直接跳转至中断服务程序标号为 `myint` 处执行。在中断服务程序中标识符为 `myint` 处，`Low led` 语句清零 RB7 引脚，关闭 LED，`Pause` 语句等待 500ms，在此期间 LED 保持熄灭状态。下一行语句设置 INTCON.1 位为 0 以清除中断标志。当引脚 RB0 接收到中断信号时，CPU 内部自动将中断标志位设置为 1，该位必须在退出中断服务程序之前复位为 0，以便后续中断得以响应。在 `myint` 子程序的最后，控制返回到主程序循环发生中断的位置。实验练习 9 探讨了本节给出的概念和例子。

7.7　连接常见的 PIC 外围设备

本节介绍 PIC 与两种常见外围设备的连接。第一种是有 12 个按键的键盘，它可用于输入数字数据。第二个是液晶显示器，它可用于输出消息和数字信息给用户。更多信息或其他可用的外围设备可在线获得(见网络链接 7.7)。

7.7.1　数字键盘

图 7-9 展示了一个常见的三行四列的 12 个按键的**键盘**。图 7-10 显示了两个常见键盘的照片，一个有 12 个键并带扁平电缆接口，而另一个有 16 个键并带有焊盘以连接导线。键盘中的每个键都连接到一个常开按钮开关上。当一个键按下时，它所对应的开关闭合。图 7-11 说明了与 PIC16F84 连接的键盘推荐使用的接口原理图，一个标准的键盘带有 7 芯连接头，用于连接扁平电缆的插座。键盘的每行、每列分别对应一个引脚，引脚的行列编号如图 7-11 所示。

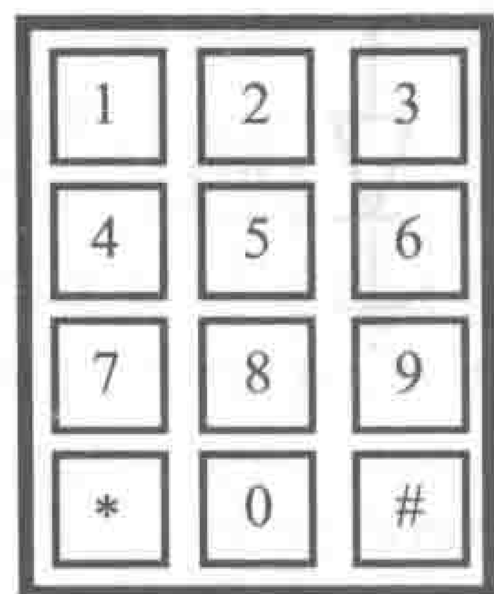


图 7-9　数字键盘

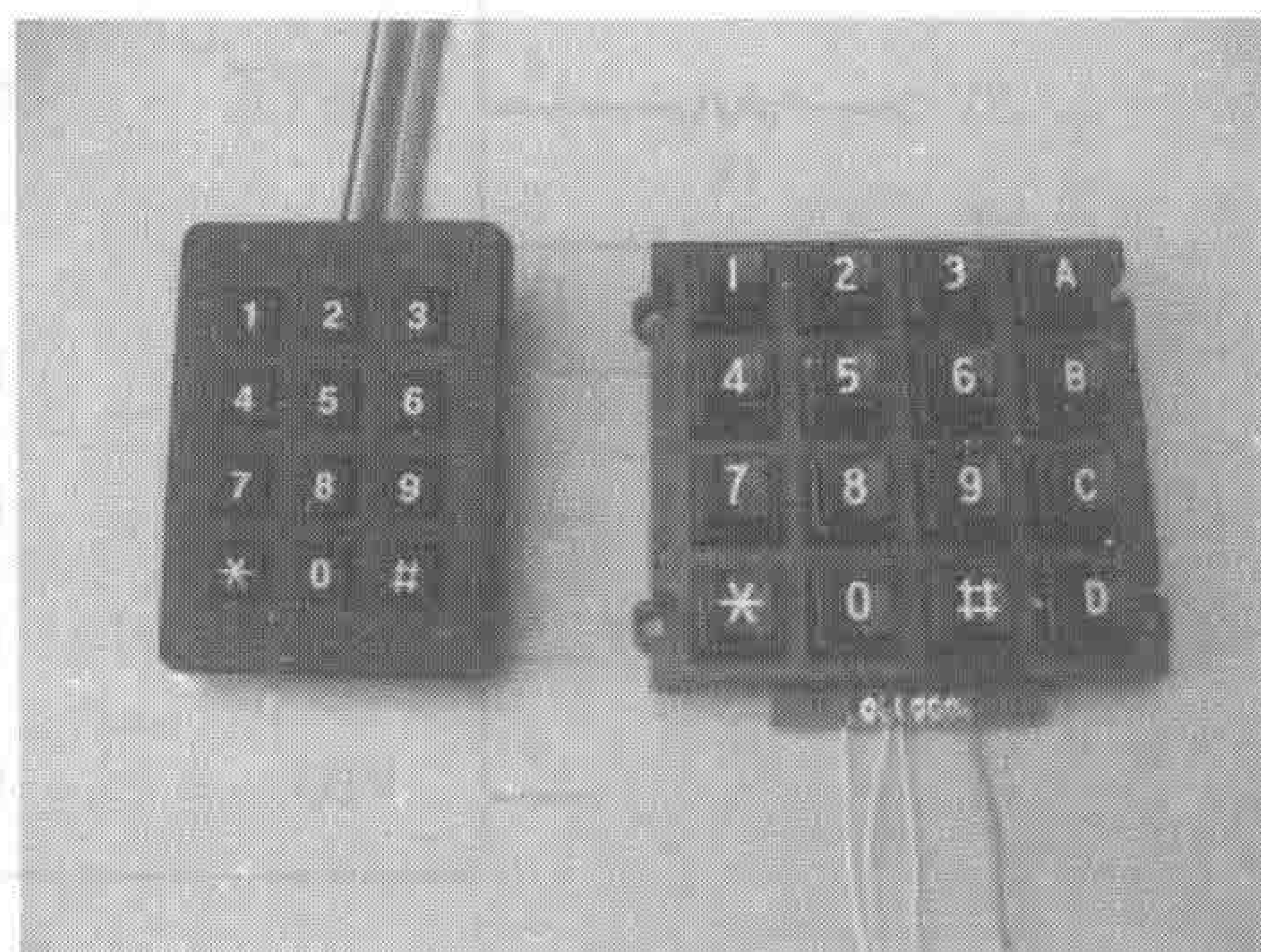


图 7-10　12 键和 16 键数字键盘的照片

键盘中四行(第 1、2、3、4 行)分别连接至引脚 RB7～RB4(配置为输入)。由于内部上拉电阻可以作为软件的一个选项来配置引脚作为输入，因此不需要单独外加上拉电阻

(详见 7.8.1 节)。键盘中的三列(第 1、2、3 列)连接至 RB0～RB2(配置为输出)。以下的 PicBasic Pro 代码包含初始化和轮询循环的框架，这个循环可以用于处理来自键盘的输入。列输出每次只有 1 列置为低(0)，通过轮询行输入的状态来确定当前输出 0 的列是否有按键开关闭合。例如，若列 1 输出低电平，列 2、列 3 输出高电平，且只有“1”键按下，则行 1 输入将为低，而其他行输入维持为高(1)这表明键“1”被按下。应当增加 If 语句块下的注释信息以完成相应的按键功能。

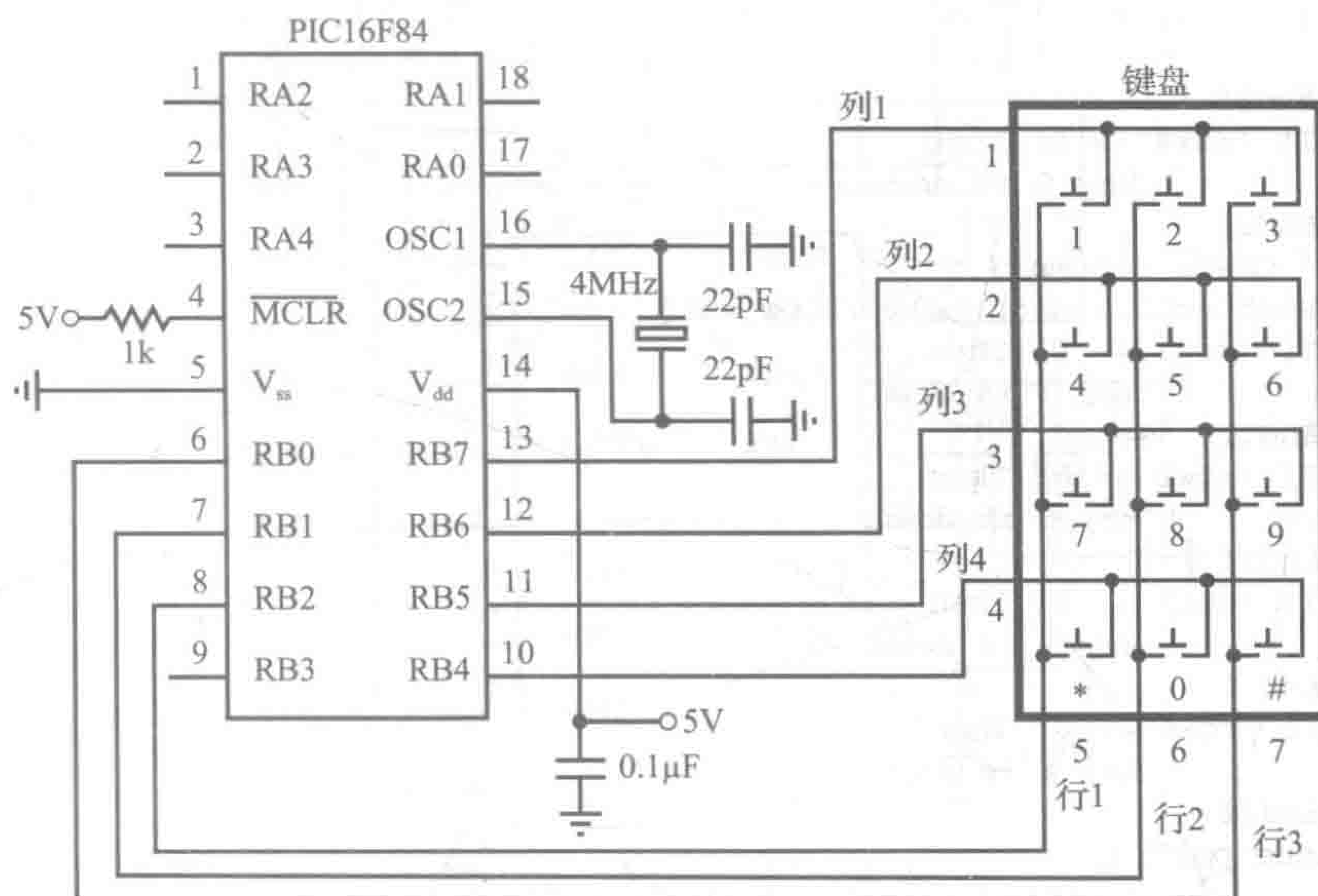


图 7-11　数字小键盘示意图及其与 PIC 的连接

```
' Pin assignments
row1 Var PORTB.7
row2 Var PORTB.6
row3 Var PORTB.5
row4 Var PORTB.4
col1 Var PORTB.2
col2 Var PORTB.1
col3 Var PORTB.0

' Enable PORTB pull-ups
OPTION_REG = $7f

' Initialize the I/O pins (RB7:RB4 and RB3 as inputs and RB2:RB0 as outputs)
TRISB = %11111000

' Keypad polling loop
loop:
       ' Check column 1
       Low col1 : High col2 : High col3
       If (row1 == 0) Then
              ' key 1 is down
       Endif
       If (row2 == 0) Then
              ' key 4 is down
       Endif
       If (row3 == 0) Then
              ' key 7 is down
       Endif
       If (row4 == 0) Then
              ' key * is down
       Endif
```

```
        ' Check column 2
        High col1 : Low col2 : High col3
        If (row1 == 0) Then
              ' key 2 is down
        Endif
        If (row2 == 0) Then
              ' key 5 is down
        Endif
        If (row3 == 0) Then
              ' key 8 is down
        Endif
        If (row4 == 0) Then
              ' key 0 is down
        Endif
        ' Check column 3
        High col1 : High col2 : Low col3
        If (row1 == 0) Then
              ' key 3 is down
        Endif
        If (row2 == 0) Then
              ' key 6 is down
        Endif
        If (row3 == 0) Then
              ' key 9 is down
        Endif
        If (row4 == 0) Then
              ' key # is down
        Endif
  ' Continue polling
  Goto loop
  End
```

实验练习 11 探索了如何连线数字键盘并从其上接收输入。在该练习中，用键盘上的 3 个键用来控制直流电动机的运动。视频演示 7.4 展示了该实例。

7.7.2 液晶显示器

另一个常见的外围设备是标准的日立 44780 型**液晶显示器(LCD)**。LCD 具有不同的形状和大小，这样可以支持不同的文本行数和每行不同的字符数。字符数和行数的标准选项有 8×2、16×1、16×2、16×4、20×2、24×2、40×2 及 40×4。一个常见的 20×2 的 LCD 如图 7-12 所示。其原理图如图 7-13 的上部所示。LCD 的应用程序包括向用户显示消息或信息(如家用恒温器、微波或数字时钟)、显示分层输入菜单以更改设置和做出选择(如复印机和打印机)。

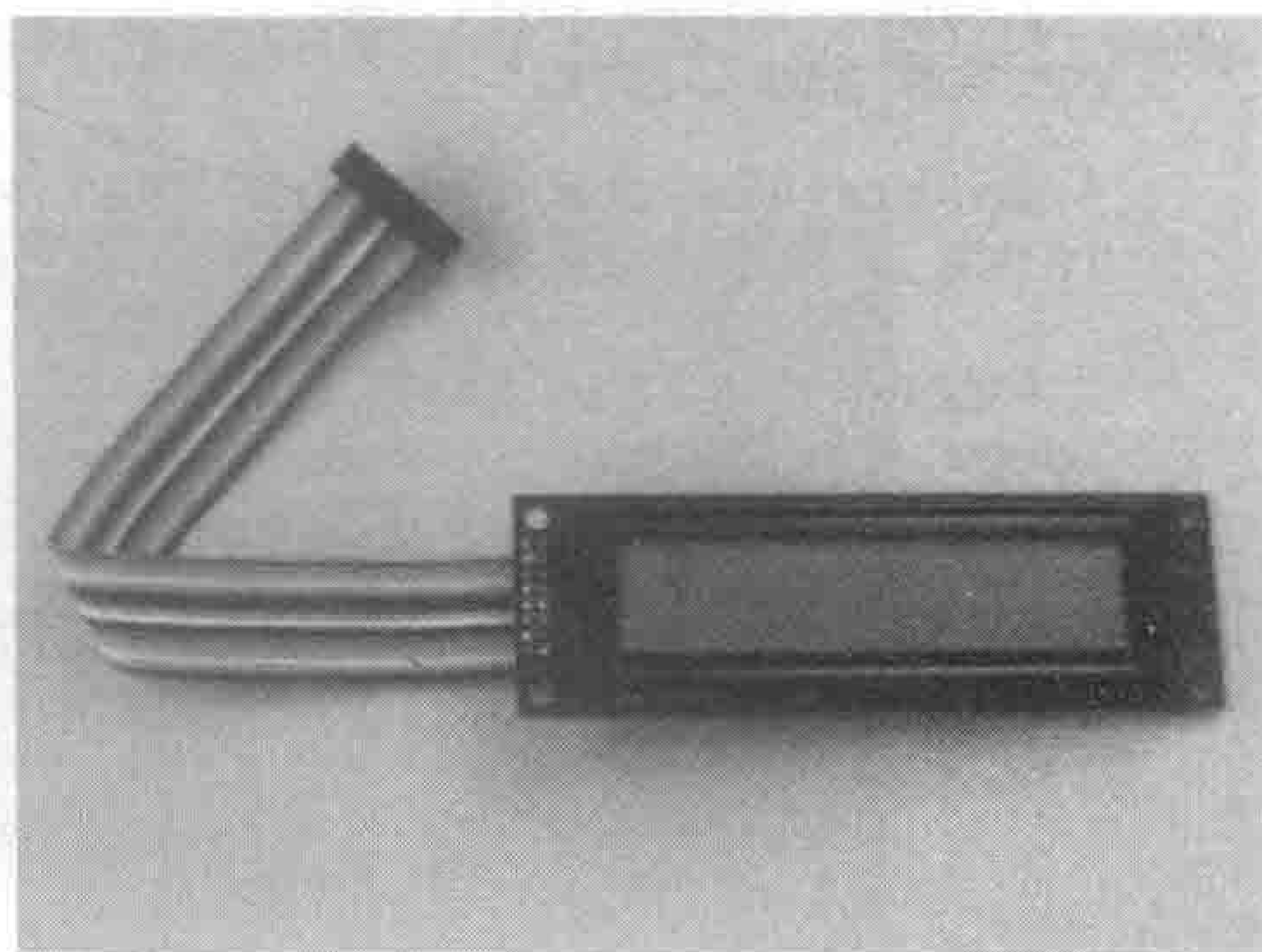


图 7-12　LCD 的照片

对于显示 80 个字符或更少的 LCD 来说(除了 40×4)，显示行为通过 14 个引脚进行控制。这些引脚的名称和描述都列在表 7-6 中。PicBasic Pro 提供了一个简单的 `Lcdout` 语句来控制 LCD 的显示。超过 80 个字符(40×4)的 LCD 通过 16 个引脚进行控制，其引脚配置与 `Lcdout` 语句不兼容。14 个引脚的 LCD 可以通过 4 根或 8 根数据线加以控制，对于这两种 PicBasic Pro 均支持，但建议采用 4 线方式以减少 I/O 的需求。对于 PIC 图 7-13 给出了使用 4 根数据线的推荐接口，命令和数据通过 DB4～DB7 发送给 LCD，DB0～DB3(引脚 7～10)未使用。引脚 RA4 通过上拉电阻连接到 5V，因为它是一个漏极开路输出(见 7.8 节)。与 Vee 相连的电位器通常用于调整

LCD 接地前后的对比度。与 LCD 通信时，RS、R/W 和 E 线由 PicBasic Pro 自动控制。液晶显示的详细信息以及如何编写接口程序可以通过互联网找到(见网络链接 7.7)。

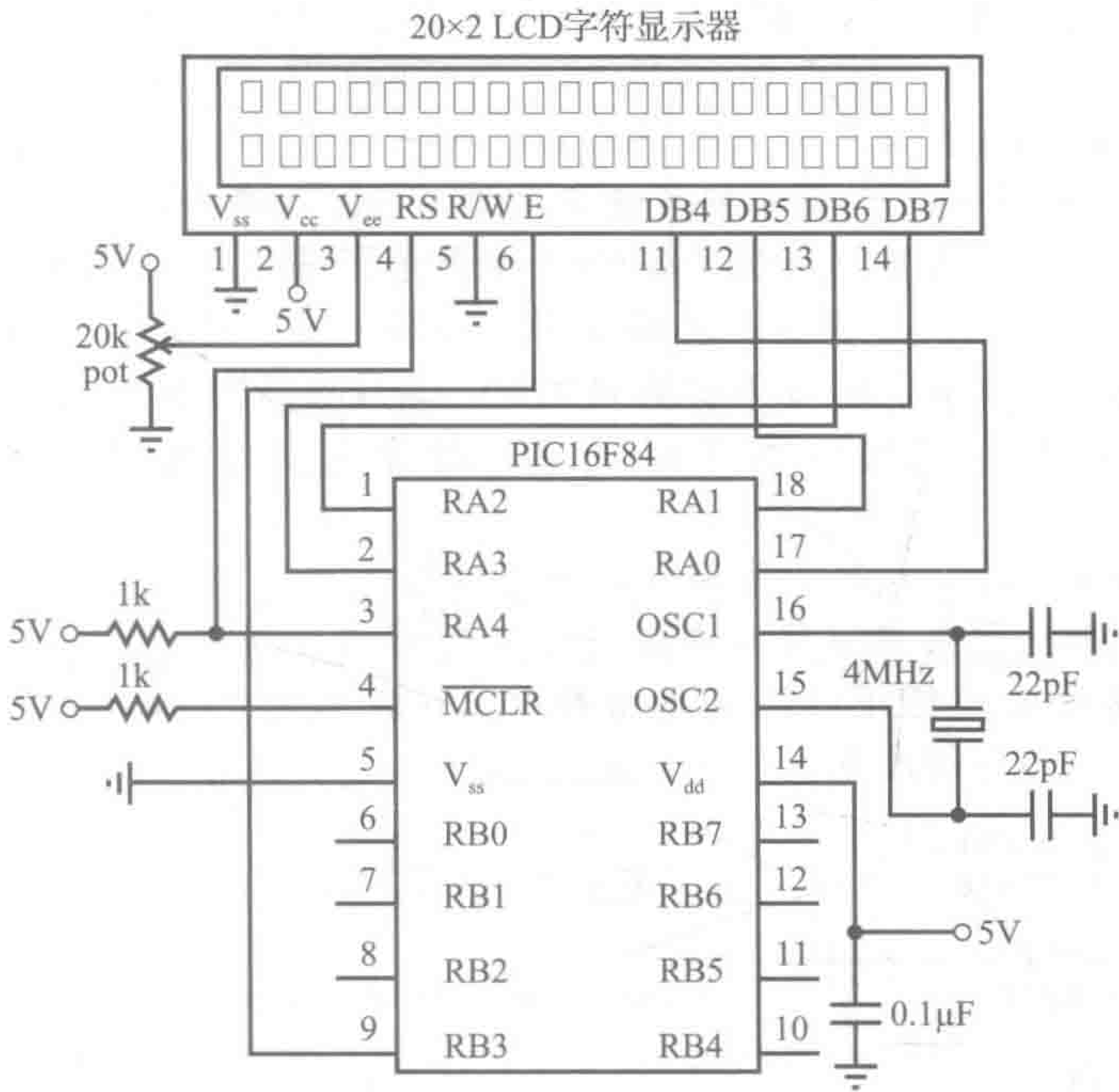


图 7-13 LCD 与 PIC 的连接

表 7-6 LCD 的引脚描述

引脚	符号	描述
1	V_{ss}	参考地
2	V_{cc}	电源(5V)
3	V_{ee}	对比度调整电压
4	RS	寄存器选择(0：指令输入、1：数据输入)
5	R/W	读/写状态(0：写数据至 LCD、1：从 LCD 的 RAM 中读数据
6	E	使能信号
7～14	DB0～DB7	数据总线

图 7-13 所示为 LCD 的硬件接口，显示控制可以通过 PicBasic Pro 的 Lcdout 语句来加以实现。该语句的最简形式为 Lcdout text(如 Lcdout "Hello World")，此处 text 为字符串常数。这一语句还支持各种命令来控制显示、光标和不同格式的输出数字和数据。Lcdout 语句更详细的信息可以参考 PicBasic Pro 编译器手册。这里提供一个用来说明命令格式的简单例子。如果 x 是一个字节变量且当前值为 123，则下面的语句：

```
Lcdout $FE, 1, "Current value for x:", $FE, $C0, " ", DEC x
```

将清除显示并输出以下两行信息：

```
Current value for x:
123
```

代码 $FE 告诉 LCD 下一个参数为命令，在上面的例子中，命令 1 清除显示，命令 $C0 使光标移动到下一行的开始处。前缀 DEC 用来告诉 LCD 以十进制数字格式输出随后的数据而非其对应的 ASCII 字符。视频演示 7.5 展示了例子中的 Lcdout 语句，显示的数据通过一个 For 循环每次加 1。

渐进设计实例 C.2 直流电动机位置和速度控制器——键盘和 LCD 连接

下图显示了渐进设计实例 C 的功能框图(参见 1.3 节和视频演示 1.8)，其中高亮部分在此处描述。

下面的原理图显示了该部分的元器件及其连接。一个名为 EDE1144 的键盘译码器的专用集成电路(见网络链接 7.8)用于监控键盘按键，并通过串行接口传输到 PIC 上。关于这个设备的详细信息可以在数据手册中查到(参见网络链接 7.9)。EDE1144 除了能够监控和传送键盘按键信息以外，还能够驱动蜂鸣器以提供按键声音反馈。Beep 信号用于开关晶体管使得蜂鸣器振荡发声。当按下键盘按键时，与蜂鸣器并联的 LED 提供了一个视觉提示。连接 LCD 的标准方式如图 7-13 所示，这允许方便地使用 PicBasic Pro 语句 Lcdout。

下面的一部分 PicBasic 代码主要用于接收键盘输入的信息，并在 LCD 上显示菜单驱动的用户界面。代码的其余部分将在渐进设计实例 C.3 中进行展示。在主循环第一行的 Serin 语句用于接收来自 EDE1144 的键盘数据，一系列的 If 语句根据用户选择调用合适的子程序，更详细的介绍参见渐进设计实例 C.3。

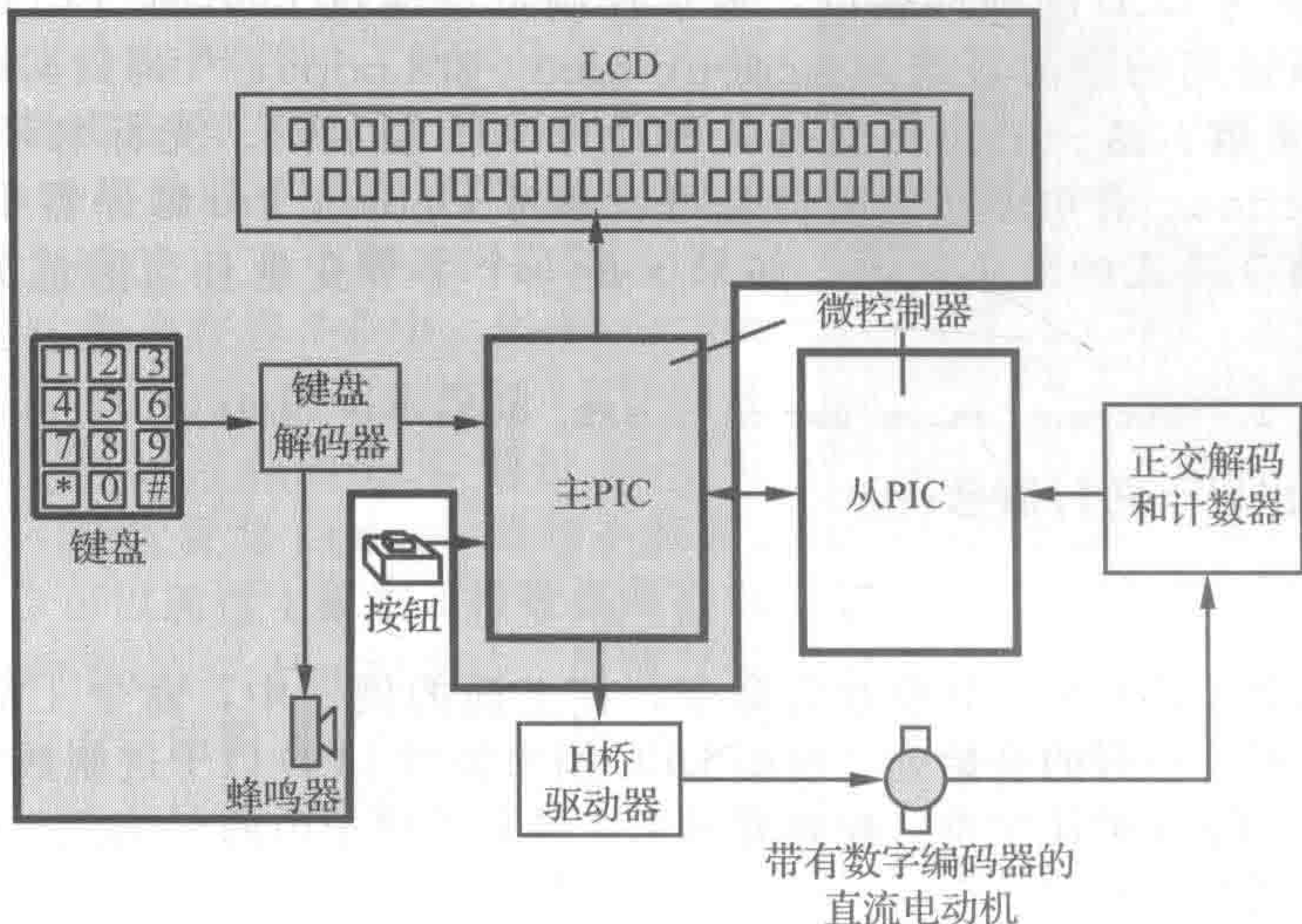
```
' Define I/O pin name
key_serial Var PORTB.0          ' keypad serial interface input

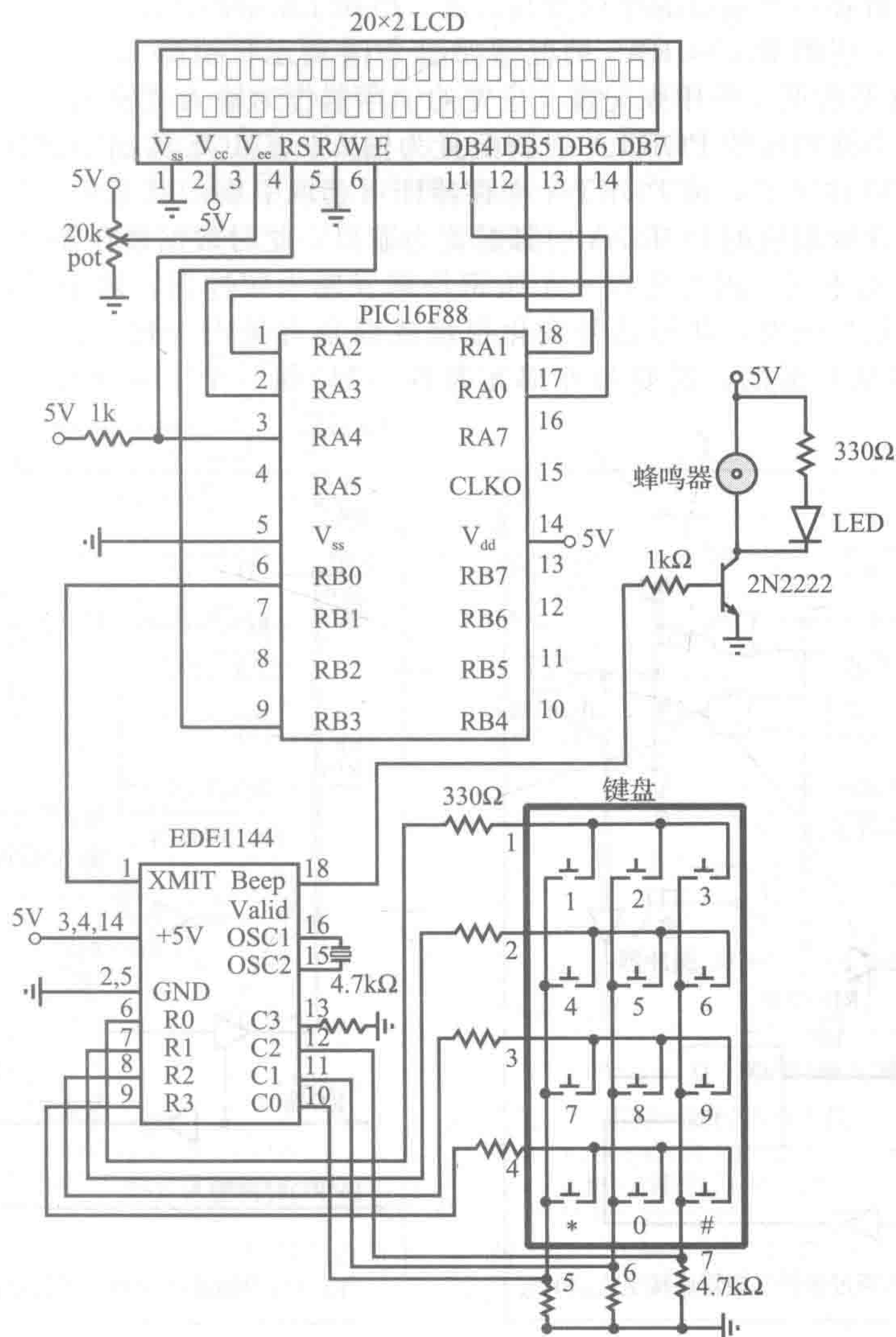
' Declare Variables
key_value Var BYTE              ' code byte from the keypad

' Define constants
key_mode Con 0                  ' 2400 baud mode for serial connection to
                                  keypad.
key_1 Con $30                   ' hex code for the 1-key on the keypad
key_2 Con $31                   ' hex code for the 2-key on the keypad
key_3 Con $32                   ' hex code for the 3-key on the keypad

' Wait for a keypad button to be pressed (i.e., polling loop)
Gosub main_menu                 ' display the main menu on the LCD

main:
    Serin key_serial, key_mode, key_value
    If (key_value = key_1) Then
       Gosub position
    Else
    If (key_value = key_2) Then
       Gosub speed
```






```
        Else
        If (key_value = key_3) Then
           Gosub adjust_gains
        Endif : Endif : Endif
Goto main     ' continue polling keypad buttons
End ' end of main program
' Subroutine to display the main menu on the LCD
main_menu:
        Lcdout $FE, 1, "Main Menu:"
        Lcdout $FE, $C0, "1:pos. 2:speed 3:gain"
Return
```

7.8 与 PIC 的连接

本节讨论 PIC 与不同的输入和输出设备之间的连接。如 7.5.1 节所示，每个 I/O 端口的引脚均可由软件配置为输入或输出。此外，引脚可以与其他功能复用来使用 PIC 的附加功能。本节将了解 PIC16F84 的不同输入和输出端口的原理图。这些端口是 TTL 和 CMOS 器件的不同组合，当连接其他设备至 PIC 时需考虑其电压和电流的极限值。可以首先参考 6.11 节来回顾 TTL 和 CMOS 等效输出电路和开漏输出电路的细节。

首先分别来看看各个端口的结构及其功能。PORTA 是由 RA0～RA4 组成的具有 5 位宽度的锁存接口。引脚 RA0～RA3 的框图如图 7-14 所示，引脚 RA4 的框图如图 7-15 所示。TRISA 寄存器的低 5 位用来配置 5 位宽的锁存器作为输入或输出。设置 TRISA 中的一位为高电平将会使相应的 PORTA 引脚配置为输入。CMOS 输出驱动器处于高阻状态，即相当于从电路中移除了，读 PORTA 寄存器即可获取引脚的状态值。使 TRISA 中的一位为低电平，将导致相应的 PORTA 引脚配置为输出，此时数据锁存器锁存的数据将输出至引脚。RA4 略有不同，因为它有一个施密特触发输入缓冲器，这个缓冲器能够由具有不同变化速率的信号触发，甚至信号变化很慢或混杂有噪声干扰(见 6.12.2 节)。此外，RA4 的输出结构是开漏的，需要和外部元器件一起(如一个上拉电阻)才能完成信号的输出。

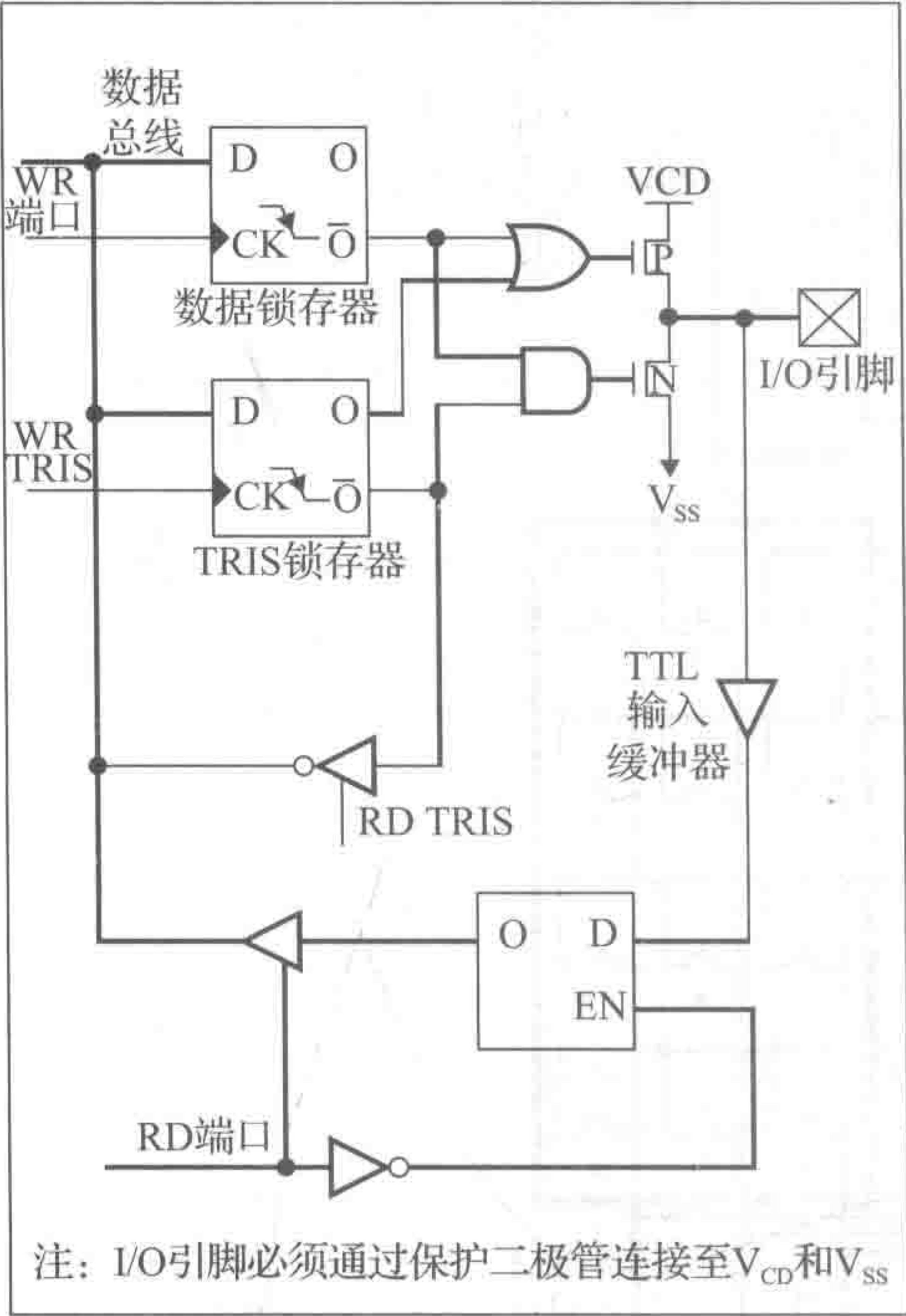


图 7-14　RA0～RA3 引脚结构框图(资料由微芯公司提供)

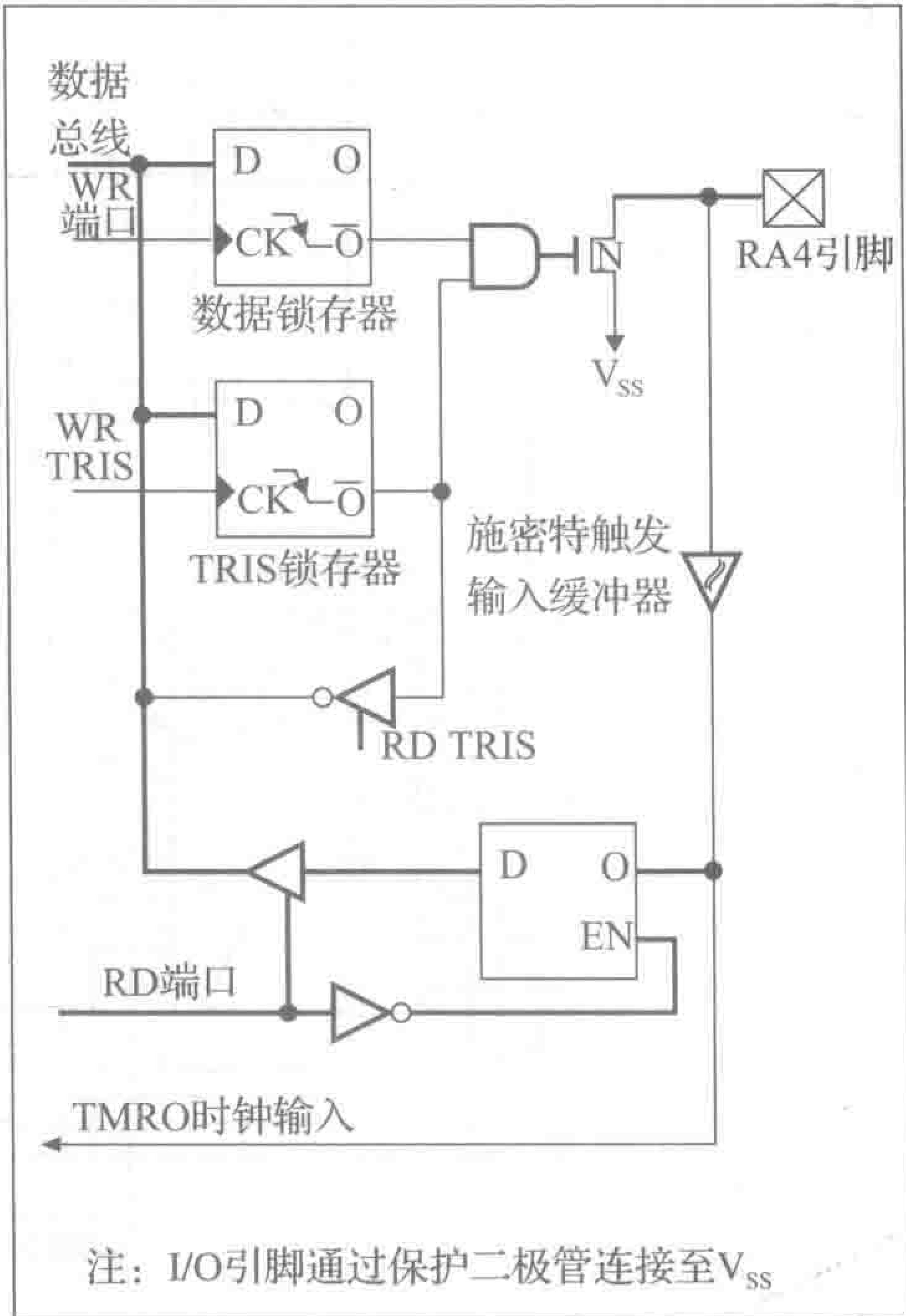


图 7-15　RA4 引脚结构框图(资料由微芯公司提供)

PORTB 也是双向的，但其宽度为 8 位。它的数据方向可以通过使用 TRISB 来进行配置。图 7-16 显示了引脚 RB4～RB7 的原理图，图 7-17 显示了 RB0～RB3 的原理图。TRISB 寄存器的任意位为高电平将设置三态门进入高阻状态，从而禁止输出驱动。TRISB 寄存器的任意位为低电平将使得数据锁存器的内容出现在相应的输出引脚上，此外，所有的 PORTB 引脚均具有**弱上拉** FET，这些 FET 通过一个单一的控制位 $\overline{\text{RBPU}}$ 来控制(寄存器 B 上拉为低电平时有效)。当该位为低电平时，FET 充当一个弱上拉电阻。当端口引脚配置为输出时，上述上拉自动禁用。$\overline{\text{RBPU}}$ 由软件通过 OPTION_REG 专用寄存器进行设置(见 7.6 节)。

7.8.1　PIC 数字输入的连接

图 7-18 说明了如何将不同类型的元器件和数字设备作为输入接至 PIC。PIC 所有的 I/O 引脚通过 TTL 输入缓冲器(RA0～RA3、RB0～RB7)或施密特触发器输入缓冲器(RA4)配置为输入。施密特触发器能够增强缓变信号的抗干扰能力。因为输入引脚在 PIC 中经 TTL 缓冲，TTL 门或器件可直接与 PIC 互连，但集电极开路输出除外，此时，需要加外部上拉电

阻。因为 5VCMOS 器件的输出电压范围为 0～5V，故可直接作为 PIC 输入。当使用机械开关或键盘输入时，RB0～RB7 的弱上拉作用是有用的(见 7.7 节)。用作上拉的 FET 维持 5V 输入状态直至开关闭合使得输入为低电平。尽管 TTL 输入开路时，其状态通常为浮动的高电平，但此时 FET 的上拉依然是有用的，因为它将简化外围设备的接口(如键盘输入等)。最后，设计人员必须了解 PIC 输入、输出引脚的电流规格，对 PIC16F84 而言，每个引脚的最大灌电流为 25mA，整个 PORTA 端口的最大电流为 80mA，整个 PORTB 端口的最大电流为 150mA。

图 7-16　RB4～RB7 引脚结构框图(资料由微芯公司提供)

图 7-17　RB0～RB3 引脚结构框图(资料由微芯公司提供)

图 7-18　输入设备的接口电路

7.8.2 PIC 的数字输出

图 7-19 演示了如何将不同类型的元器件和数字器件与 PIC 的输出正确连接。RA0～RA3 引脚为完全的 CMOS 输出驱动，RA4 为开漏输出。RB0～RB7 为 TTL 缓冲输出驱动。每个引脚的最大源电流为 20mA，整个 PORTA 端口的最大源电流为 50mA，而 PORTB 端口的最大源电流为 100mA。CMOS 输出可以直接驱动单个 CMOS 或 TTL 器件。TTL 输出可以直接驱动单个 TTL 器件，但需要上拉电阻来提供一个足够高的电压以驱动 CMOS 器件。当驱动多个 TTL 或 CMOS 器件时，可以通过缓冲器来提供足够的扇出电流。因为 RA4 引脚为开漏输出，故需要外部电源。注意，当 RA4 为高电平时，输出引脚接地，小电流负载开关打开；而当 RA4 为低电平时，输出开路，负载开关闭合。当与晶体管、功率晶体管和继电器连接时，必须考虑电流需求。如果 PIC 包含了 D-A 转换器，它可以通过一个放大器直接驱动模拟负载，否则，如图中所示，需要一个带有数字 I/O 接口的外部 D-A 芯片。

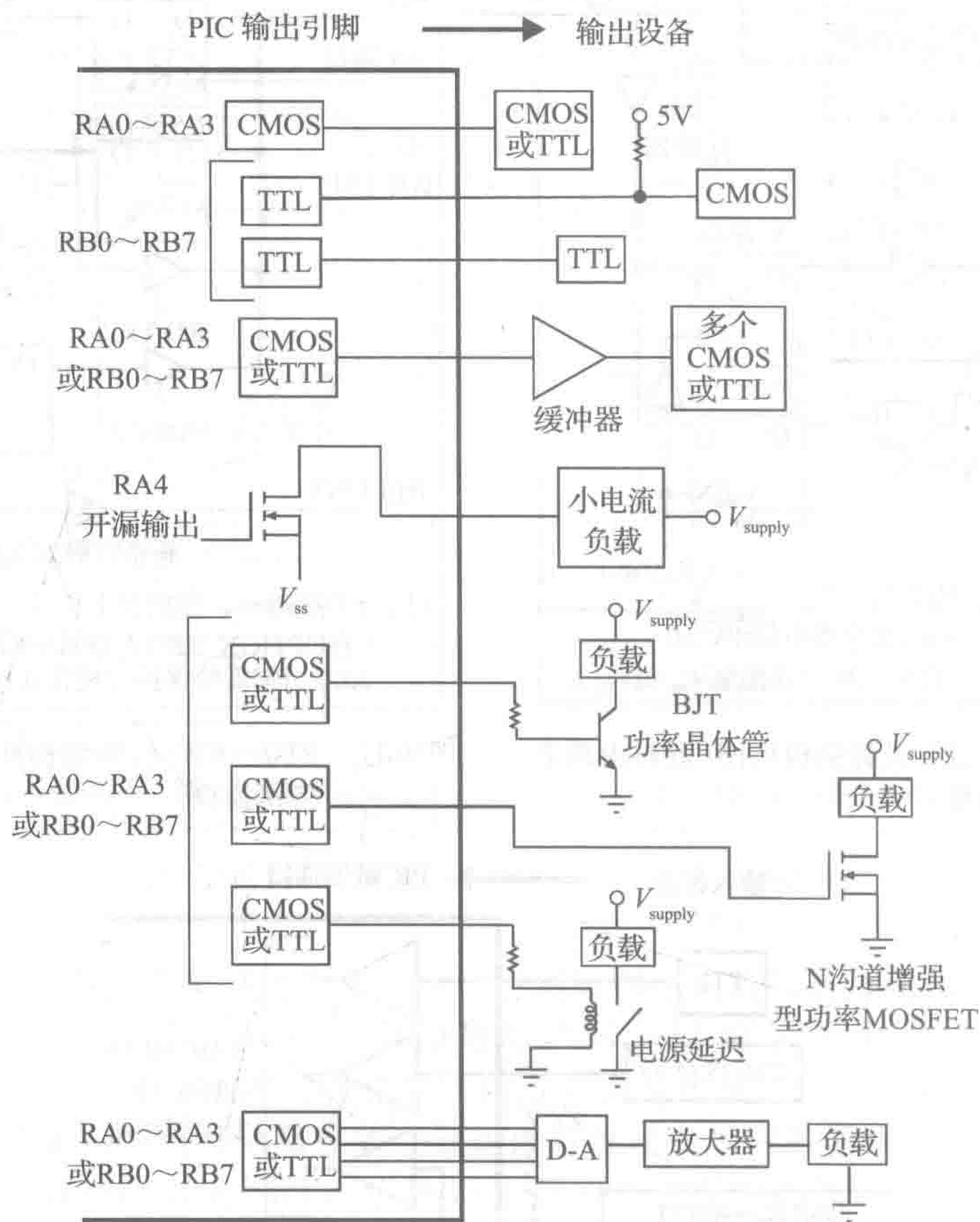


图 7-19　输出设备的接口电路

作为一个使用 PIC 数字输出来控制大电流负载的例子，实验练习 11 通过功率 MOSFET 来开关直流电动机的电源。电动机电压可以迅速开启和关闭。为了调节电动机的转速，可以改变电压开启和关闭时间的百分比(即**占空比**)。这就是所谓的**脉冲宽度调制**(更多信息参见 10.5.3 节)。

7.9 基于微控制器系统的设计方法

本章给出的所有例子均相对简单，可以使用较简洁的解决方案来展示基本的编码结

构。另外，许多设计决策也作为问题陈述的一部分加以说明。在构思一个全新的设计时，建议采用条理化的设计过程，包括从最初的问题陈述到可嵌入至应用硬件中的微控制器的设计。推荐的设计过程如下，为了说明如何应用该设计过程，我们将对设计实例 7.2 中的问题进行详细描述。实验练习 11 也展示了一个应用该设计过程的实例。

1. *定义问题* 用文字说明需要解决的问题及设备所要完成的功能(如设备应该做什么)。

2. *绘制功能框图* 绘制一个能够涵盖设计所需的主要元器件的框图，并说明它们是如何相互连接的。每个元器件可以表示为一个正方形，其内部有相应的标签。或者，更可取的是，采用图像表示(如图片或照片)。用单根线来连接元器件(不考虑导线的数量)，并用箭头指示信号流的方向。

3. *确定 I/O 需求* 列出所需的输入和输出类型和需要由微控制器执行的功能。需要确定每种类型 I/O 所需的数量，包括数字输入、数字输出、A-D 转换器、D-A 转换器和串行端口等。

4. *选择合适的微控制器模型* 基于前述步骤所述的输入/输出类型和数量，选择一个或多个具有充足片内资源的微控制器。另一个影响选择的因素是预期所需的程序和数据存储器的空间。如果程序非常复杂，应用需要大量的数据存储，则需要选择一个具有足够内存的微控制器。如果需要多个 PIC(由于 I/O 和/或内存约束)，多个 PIC 可以通过 I/O 线经过简单的握手来互相通信(如完成某项功能前等待来自另一个 PIC 的信号变高，功能完成后发送另一个信号返回给这个 PIC)或由 PicBasic Pro 的 `Serout` 和 `Serin` 语句进行串行通信(在 PIC 之间共享数据)。可用的模型和内存容量请参考制造商提供的文档。微芯公司完整的 PIC 产品信息可以在网上找到(见网络链接 7.10，它指向 www.microchip.com 网址可编程闪存微控制器产品线列表)。

5. *确定必要的接口电路* 参考微控制器输入和输出电路的规格，并根据 7.8 节中的信息，利用上拉电阻、缓冲区、晶体管、继电器和放大器来设计合适的接口电路。在需要许多数字 I/O 的情形下，如果选定的微控制器的 I/O 引脚数量不足，可以通过许多方法实现较少的引脚与大量 I/O 的接口。一个方法是使用移位寄存器(如 74164、74594 或 74595 作为输出，74165 或 74597 作为输入)，这样很少的 I/O 引脚(非锁存 I/O 有 2 个引脚，锁存型 I/O 有 3 个引脚)即可实现对 8 位寄存器(若 I/O 为 8 线)位的串行移入或移出。另一种扩展 I/O 能力的方法是使用一个多路复用可编程 I/O 端口的设备(例如，英特尔 82C55A 可编程外围接口或 PPI)。这种类型的设备允许一个 I/O 端口，可以切换访问多个 I/O 端口。英特尔的 82C55A 有 5 根控制线和 8 根数据线可以提供 24 位通用的、用户可配置的 I/O。

6. *确定一种编程语言* 代码可以采用汇编语言或高级语言(如 C 或 PicBasic Pro)，来编写。对大多数应用程序来说，建议选择 PicBasic Pro。只有当需要极快的执行速度或者内存容量是一个限制因素时，汇编语言才是一种更好的选择。如果解决方案需要复杂的计算、算法或数据结构，那么 C 是一个更好的选择。

7. *画原理图* 画一个包含所需元器件、输入和输出接口电路和连线的详细原理图。如果使用 PIC16F84，图 7-4 是一个很好的示例。

8. *画出程序流程图* **流程图**是一个表示所需软件功能的图形。图 7-20 展示了一组用来绘制流程图的图形块。流程控制块用作 `goto` 分支或循环(如 `For…Next`、`While…Wend`)目的标号。功能块表示一个或多个执行指令完成相应的任务。决策块表示逻辑决策。设计实例 7.2 展示了如何构建一个典型的流程图。

9. *编写代码* 编写代码实现软件流程图的功能。

10. *构建和测试系统* 将代码编译成十六进制机器码文件，并下载到微控制器中。该过程可以通过制造商的编程设备来完成。网络链接 7.11 指向使用 PicBasic Pro、

MPLAB、PicStart Plus 编程器编写软件、编译和下载代码的全部步骤。该过程在实验练习 9 中也有介绍和应用。下载代码后，组装系统硬件，包括微控制器和接口电路。然后，全面测试系统所需的功能。建议逐步累积以完成步骤 9 和 10，在进行下一步之前仔细测试每一个新增的功能。例如，首先确保你可以读取和处理一个输入。然后添加和测试额外的输入，并逐步添加和测试输出功能。换句话说，不要试图在第一次尝试中编写完整的程序。

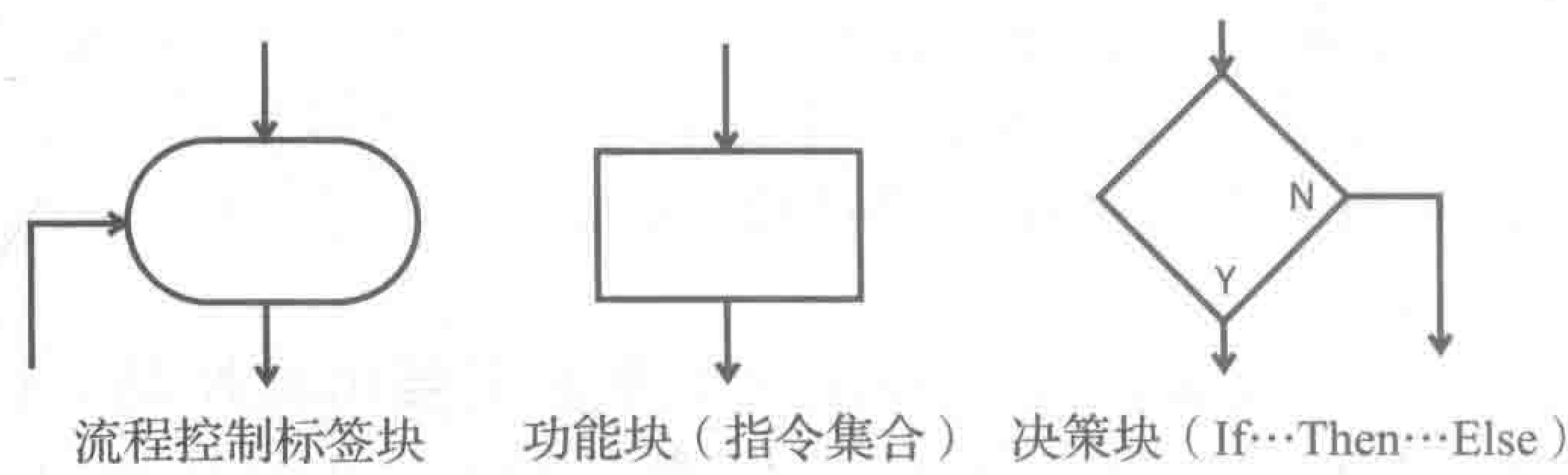


图 7-20 软件流程图构建块

更多设计、构建和测试微控制器系统的建议，包括如何选择电源，见 7.10 节。

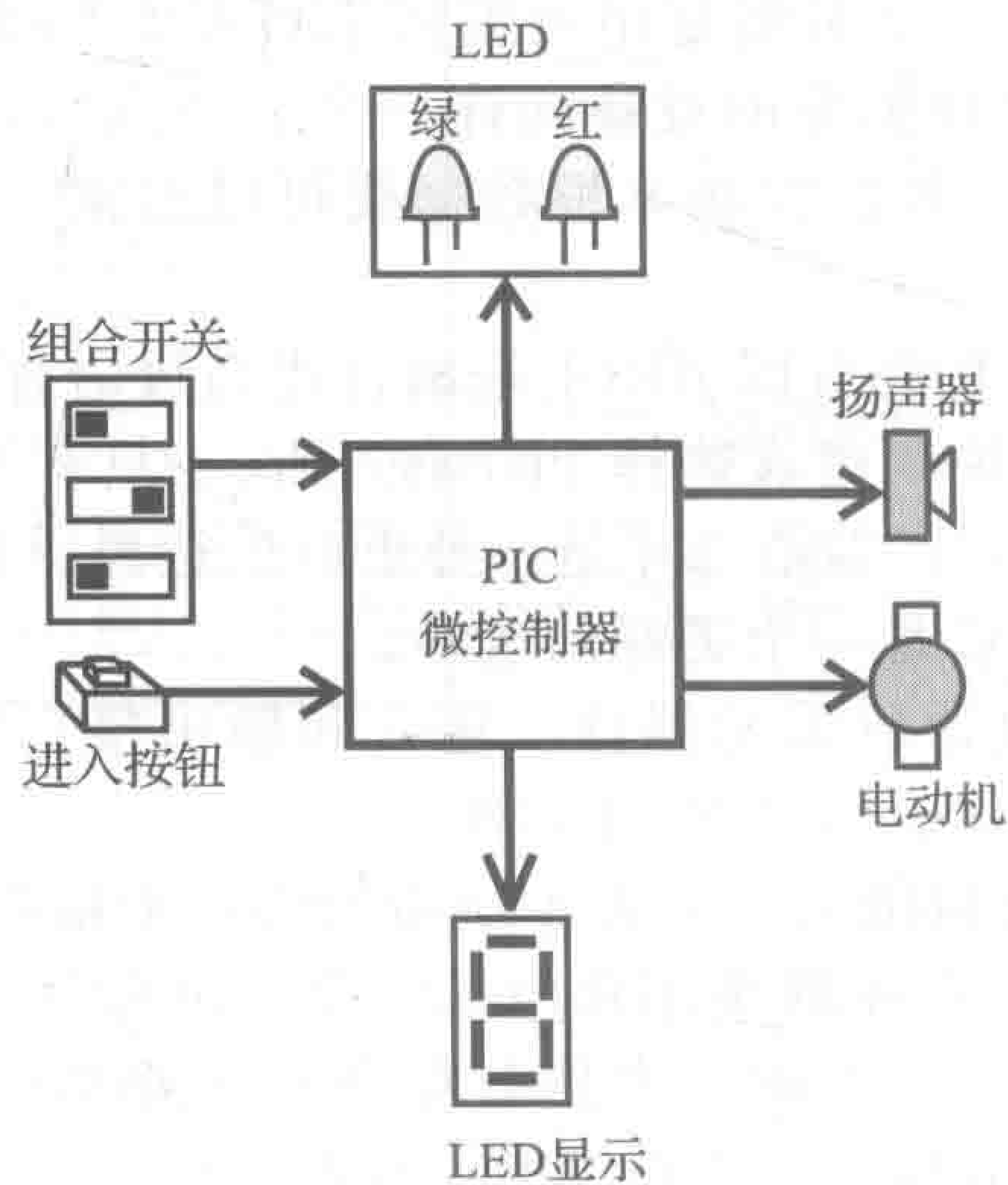
设计实例 7.2 PIC 驱动安全装置的解决方案

此例为来源于数年前本课程布置的一个有趣的课程项目，网络链接 7.12 为项目的一般描述。网络链接 7.13 指向此处描述的组合安全装置项目的具体指南。实验练习 15 也介绍了该课程项目，并为微控制器部分提供了有用的参考信息，包括微控制器的供电以及使用电池、使用继电器和使用晶体管的对比，焊接及其他实际问题的处理。

此处介绍项目的基本设计过程，然后给出部分学生的解决方案，因为项目中有趣的部分就是方案中学生展示出的创造性。

1. 定义问题 项目的目标是使用 PIC16F84 微控制器设计组合安全锁装置。装置需求包括开关输入的组合、一个触发组合的按钮开关、测试组合成功与否的 LED 和蜂鸣器、一个显示尝试失败次数的数字显示器和一个执行相应输出功能的执行器。在这里给出的简单设计，通过使用 3 个切换开关组合可以允许 8 个可能的组合。

2. 画功能框图 下图给出了本设计示例中的主要元器件。



3. 确定 I/O 需求 本项目涉及的输入和输出都是数字量。

输入：

- 3 个开关用于组合状态

● 一个按钮开关作为回车键

输出：

● 两个 LED 指示组合的状态

● 一个七段数码管

● 一个小扬声器

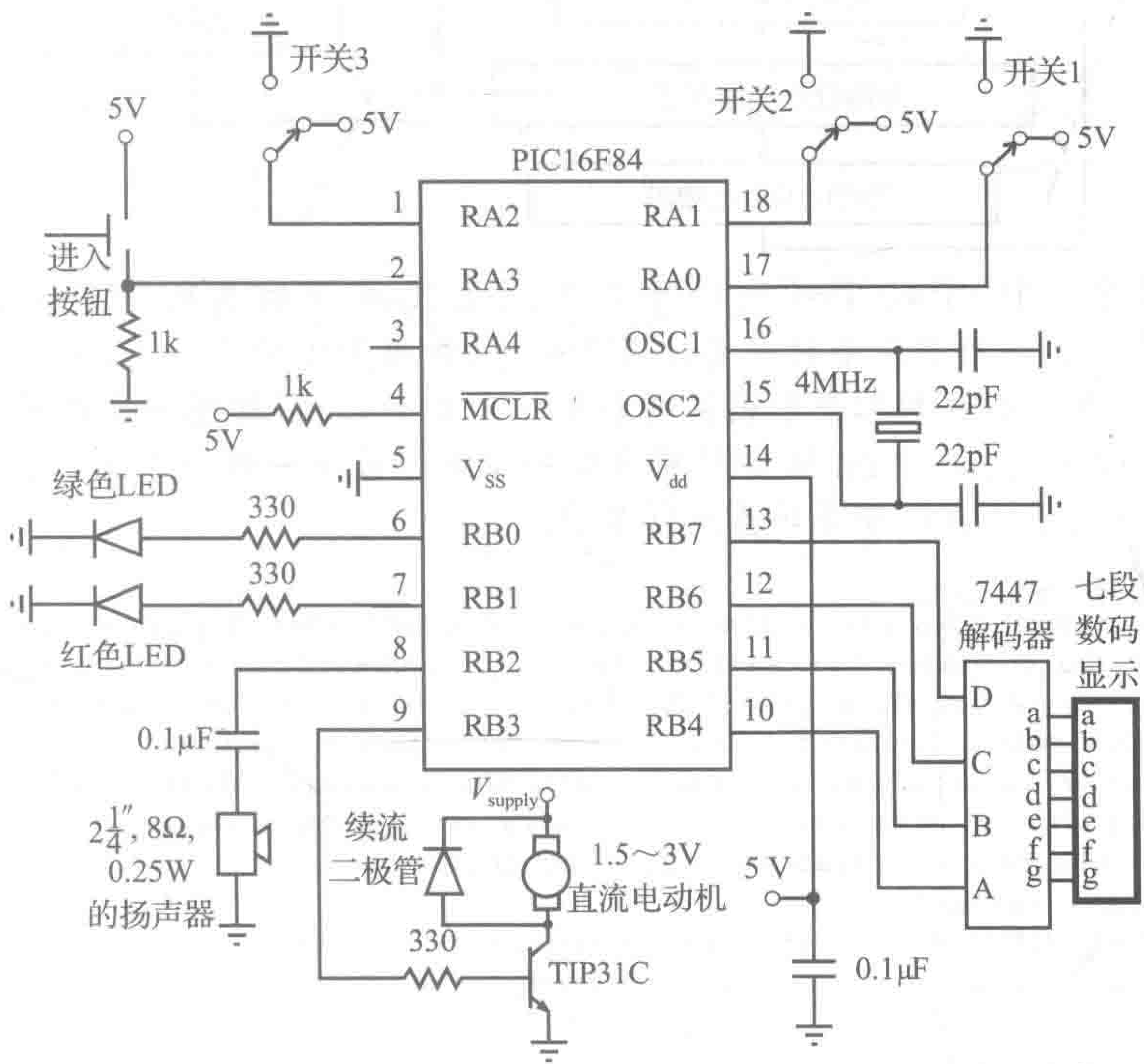
● 一个小型直流电动机

4. **选择合适的微控制器模型**　如果采用 4 根数字输出线驱动七段数码管(见设计实例 7.1)，则所需数字 I/O 线的数量是 12。此项目只需要 I/O 口(即无需 A-D、D-A 转换器或串口)，PIC16F84 提供了 13 个数字 I/O 引脚，能够满足要求。

5. **确定必要的接口电路**　需要一片 7447 芯片解码 4 根数据线的输出用于驱动七段数码管(见设计实例 7.1)。小型扬声器可以通过串联电容器直接驱动，可参考 PicBasic Pro 编译器手册中的 Sound 语句。PIC 没有足够的电流直接驱动电动机，所以需要由一个数字输出控制功率晶体管，由其驱动电动机。唯一未使用的 I/O 口为 RA4，它是专用施密特触发器输入和开漏输出。

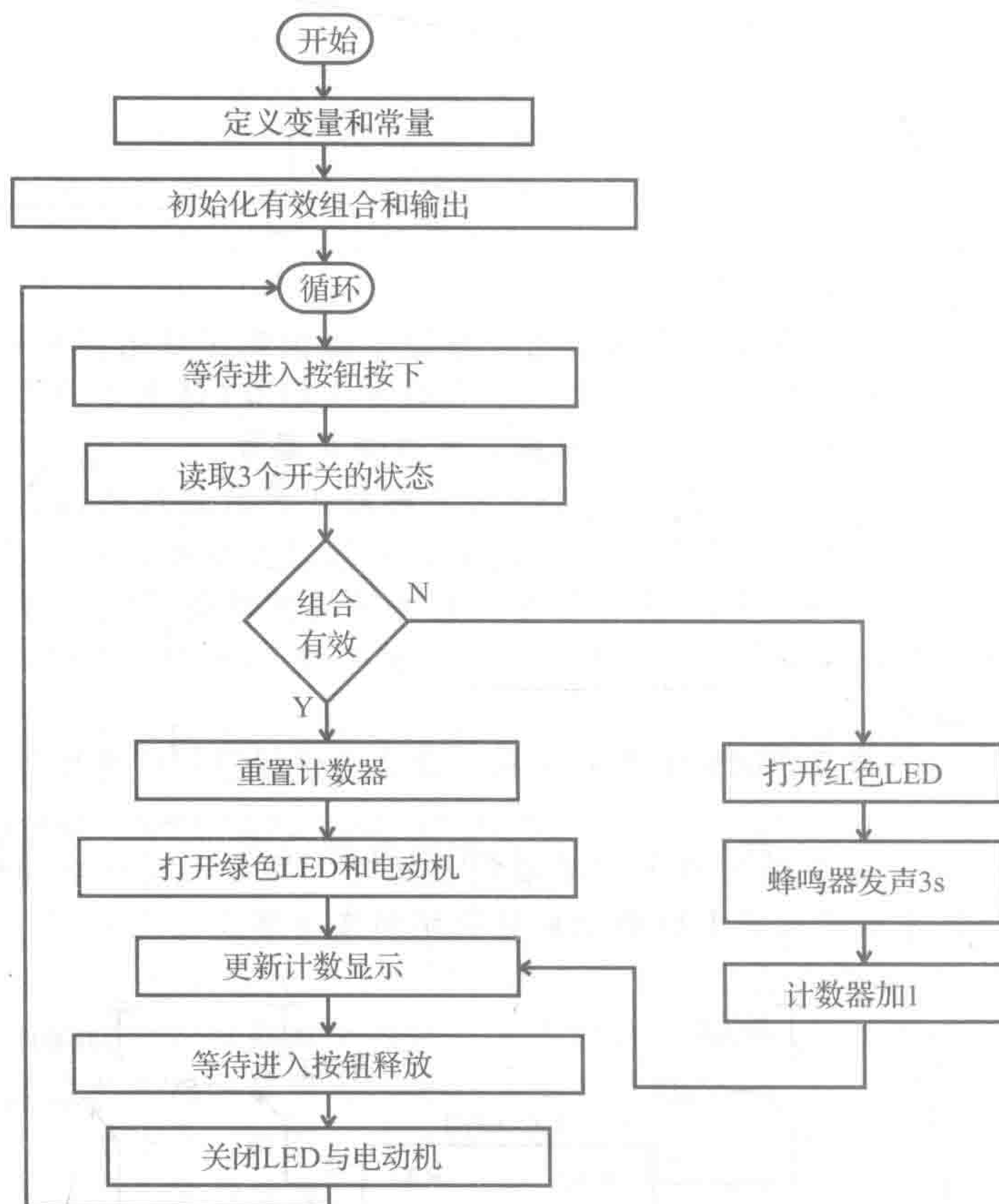
6. **确定编程语言**　使用 PicBasic Pro 编程。除非有存储空间或速度的限制，否则高级语言应该是第一选择。

7. **画原理图**　下面的原理图给出了必要的元器件。尽管不同的功能使用哪一个 I/O 管脚无关紧要，但图中还是根据 I/O 的功能将其组织在一起。



注：1″(1 in)=25.4mm

8. **画出程序流程**　图下图说明了执行所需功能的逻辑和流程。当按钮开关按下后，程序检查 3 个开关的状态并与预存的开关状态组合进行比较。如果组合是有效的，只要按钮开关一直按住，则绿色 LED 和直流电动机将持续打开。如果是无效的组合，红色 LED 点亮，并使蜂鸣器发声 3s，数字显示的尝试失败次数加 1。当输入组合状态有效时，计数器显示次数重置为 0。



9. *编写程序*　PicBasic Pro 代码可以用来实现所示的逻辑和流程。注意，多个 PicBasic Pro 语句在一行中使用时应通过冒号分开(如程序中的多个 Low 语句)。此外，长语句可以通过在第一行语句加下划线将剩余部分转到下一行(如程序中的长 If 语句)。由于字节变量 number_invalid 取值限制为 0～9，4 个最低有效位采用二进制格式即可表示其取值，这也是七段数码管译码器所需要的。

```
' project.bas
' This program checks the state of three switches when a pushbutton switch is
'  pressed and compares the switch states to a prestored combination. If the
' combination is valid, a green LED and a DC motor turn on and stay on while the
' pushbutton switch is held down. If the combination is invalid, a red LED turns
' on, a buzzer sounds for 3 seconds, and the displayed digit (representing the
' number of failed attempts) increments by one. When a valid combination is
' entered, the counter display resets to zero.
' Declare all variables
switch_1 Var PORTA.0          ' first combination switch
switch_2 Var PORTA.1          ' second combination switch
switch_3 Var PORTA.2          ' third combination switch
enter_button Var PORTA.3      ' combination enter key
green_led Var PORTB.0         ' green LED indicating a valid combination
red_led Var PORTB.1           ' red LED indicating an invalid combination
speaker Var PORTB.2           ' speaker signal for sounding an alarm
motor Var PORTB.3             ' signal to bias the motor power transistor
a Var PORTB.4                 ' bit 0 for the 7447 BCD input
b Var PORTB.5                 ' bit 1 for the 7447 BCD input
c Var PORTB.6                 ' bit 2 for the 7447 BCD input
d Var PORTB.7                 ' bit 3 for the 7447 BCD input
combination Var BYTE          ' stores the valid combination in the 3 LSBs
```

```
number_invalid Var BYTE    ' counter used to keep track of the number of bad
                           ' combinations

' Initialize the valid combination and turn off all output functions
combination = %101                    ' valid combination (switch 3:on, switch
                                      ' 2:off, switch 1:on)
Low green_led : Low red_led           ' make sure the LEDs are off
Low motor                             ' make sure the motor is off
Low a : Low b : Low c : Low d         ' display zero on the digit display
number_invalid = 0                    ' reset the number of invalid combinations
                                      ' to zero

' Beginning of the main polling loop
loop:
      ' Wait for the pushbutton switch to be pressed
      If (enter_button == 0) Then loop

      ' Read switches and compare their states to the valid combination
      If ((switch_1 == combination.0) AND (switch_2 == combination.1)_
          AND (switch_3 == combination.2)) Then
            ' Turn on the green LED
            High green_led

            ' Turn on the motor
            High motor

            ' Reset the combination attempt counter
            number_invalid = 0
      Else
           ' Turn on the red LED
           High red_led

           ' Sound the alarm
           Sound speaker, [80,100]

           ' Increment the combination attempt counter and check for overflow
           number_invalid = number_invalid + 1

       If (number_invalid > 9) Then
            number_invalid = 0
       Endif
   Endif

   ' Update the invalid combination attempt counter digit display
    a = number_invalid.0 : b = number_invalid.1 : c = number_invalid.2
    d = number_invalid.3

   ' Wait for the pushbutton switch to be released
loop2: If (enter_button == 1) Then loop2

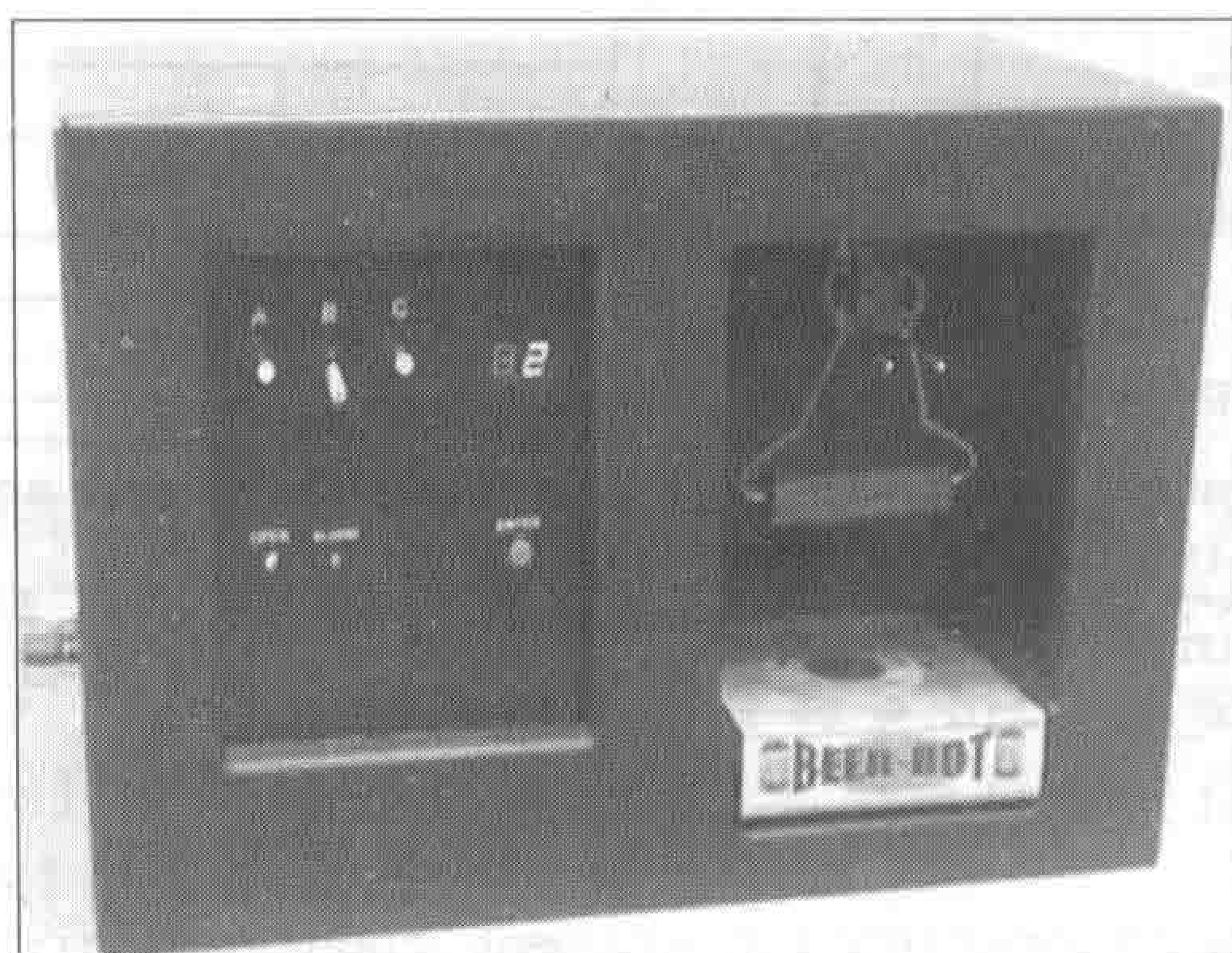
   ' Turn off the LEDs and the motor
   Low green_led : Low red_led
   Low motor

   ' Loop back to the beginning of the polling loop to continue the process
   Goto loop

   End    ' end of program
```

10. **构建和测试系统** 到此为止已经给出了详细的原理图和一个完整的程序，剩下的工作就是构建和测试系统。在测试系统时，首先将与测试功能无关的代码注释掉以便测试其余部分的代码。此例中，先将电动机驱动、报警、计数和数码管显示部分注释掉，以便测试输入组合和绿色 LED 控制。通过这种方式，我们可以确保当编程后的 PIC 插入电路后基本的 I/O 和程序的逻辑功能是正确的 。然后，逐步增加附加的功能，以实现完整的解决方案。建议第一个原型样机通过面包板搭建，直至所有的错误均被纠正，随后可以在面包板或印制电路板上制作该装置更为持久的版本。

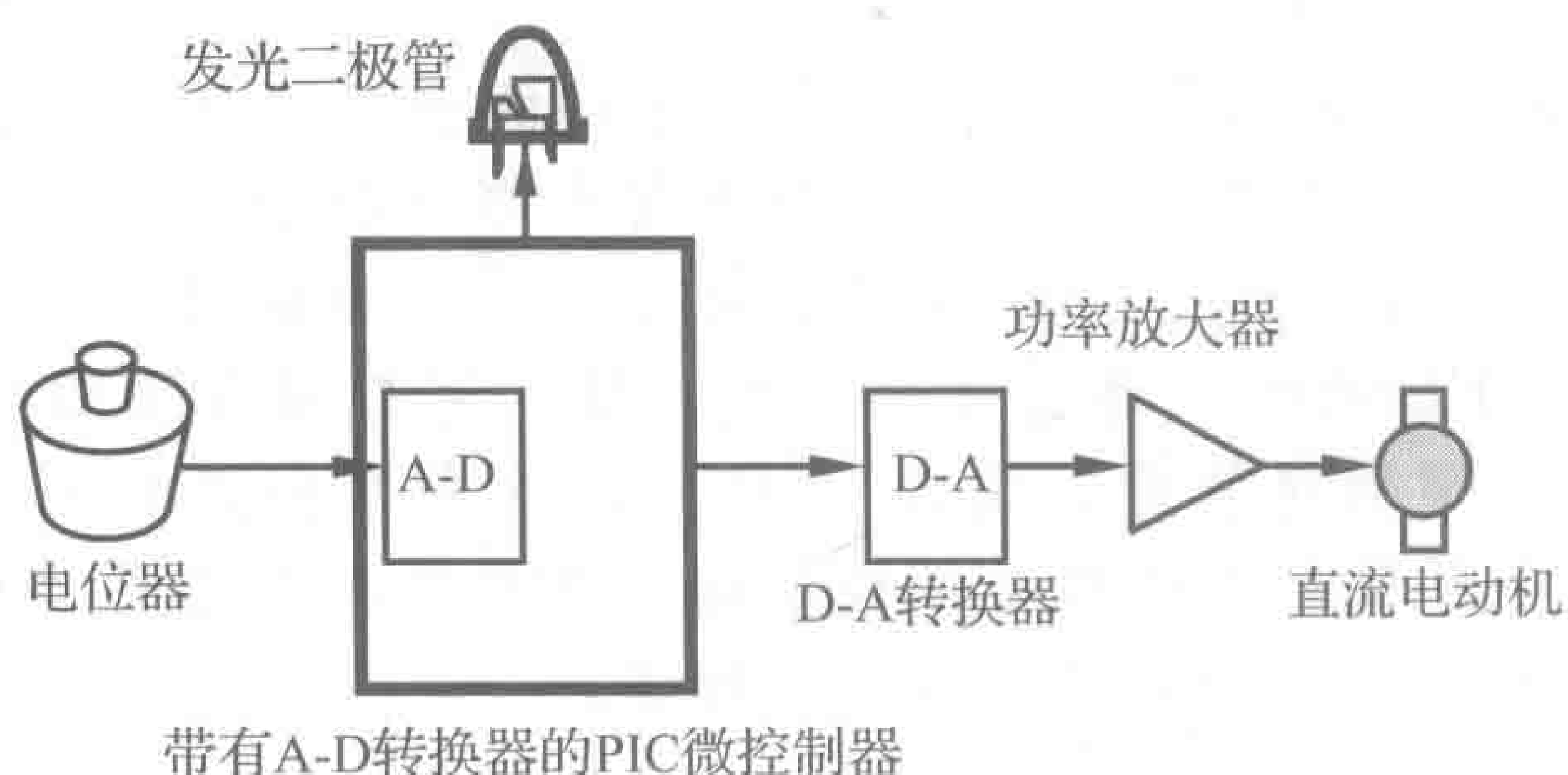
当我们布置这个课程设计项目时，每3～4个学生组成一组，给出了30组不同的设计方案，一些有趣的设计方案包括一个安全墙，在这个方案中学生制作了一段石膏墙板，其中包含了带有3个发光开关的面板，从外观上看只是一系列的开关用来控制房间的灯，但是当3个开关设置为正确的组合并且一个安装在旁边的小按钮开关按下后，一个电磁线圈将释放弹簧门从而露出隐藏的安全墙。另一个设计是火箭发射器，当正确的开关组合输入时，将产生有趣的音效(使用各种 For…Next 循环和 PicBasic Pro 中的 Sound 语句)，然后数码管完成倒计时，倒计时至零时，装置使用继电器点火一个火箭模型，模型可以上升数百英尺，然后通过降落伞软着陆。在该设计课堂演示时在我们建筑物外的院子里围满了好奇的人群。最受欢迎的设计被亲切地称为啤酒机器人，其照片如下图。如果用户知道正确的组合状态，该装置将倒一杯啤酒。当输入正确的组合时，借助直流电动机驱动齿条和小齿轮机构平台(见右下角)将伸出装置之外，其行程通过限位开关检测，平台上的托盘由弹簧支撑，一个简单的开关即可探测到是否有一个玻璃杯放置在托盘上。然后托盘缩回，打开泵从隐蔽的储液桶中抽吸液体至玻璃杯。玻璃杯缩回时两根金属导线(见右上角)同时插入玻璃杯，当液体达到一定的水平后，两根金属导线将连通使得泵停止运转，伴随着悦耳的声音效果，玻璃杯再次伸出将满杯的液体送给用户。视频演示7.6展示了啤酒机器人的动作过程。网络链接7.14给出了大量的其他同学完成的设计项目。这些视频片段是2001年以来科罗拉多州立大学最好的一些学生设计项目。



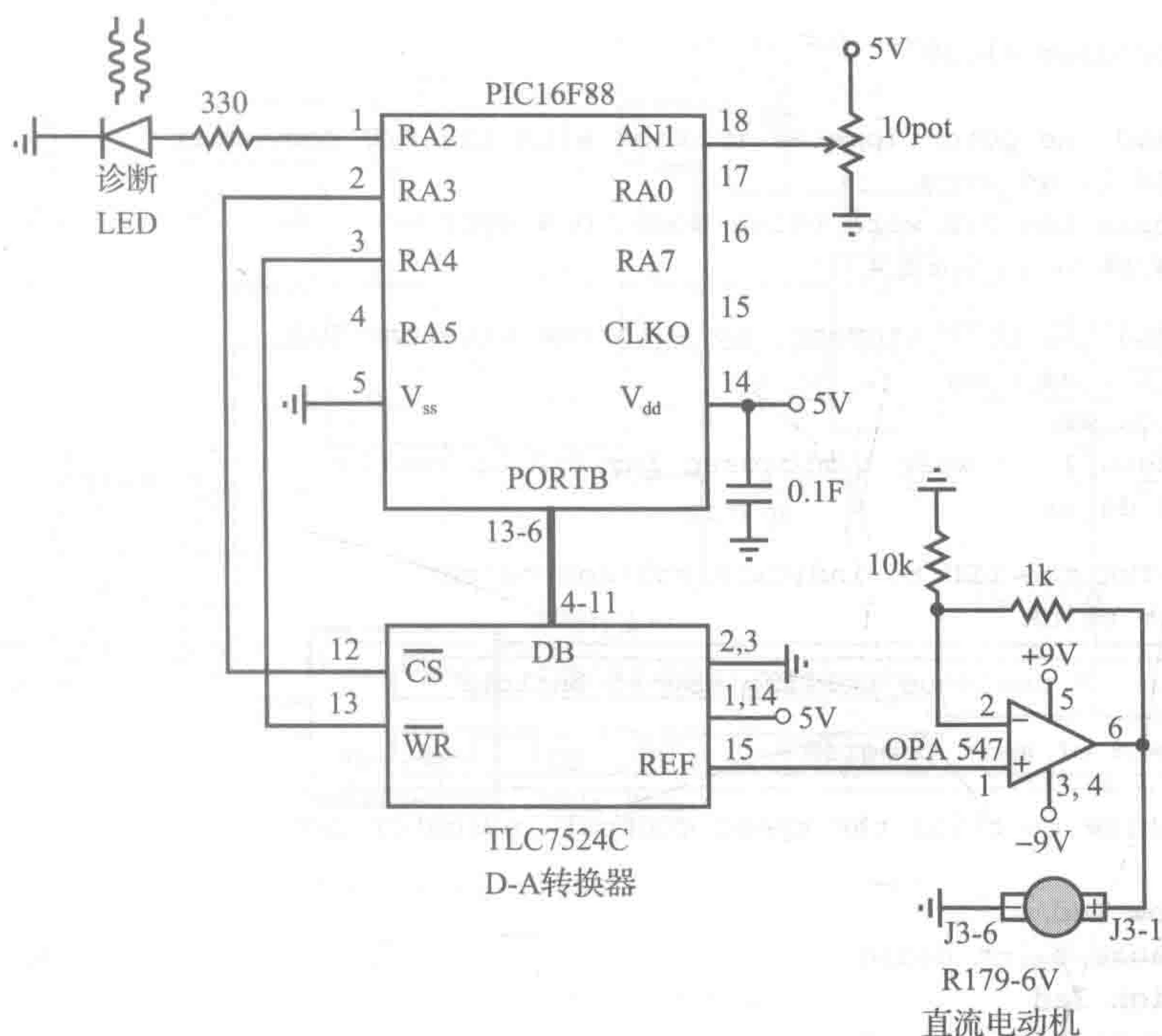
下面，我们给出3个设计实例(A、B和C)完整的硬件和软件解决方案。解决方案各部分的细节贯穿全书。所有用于构建设计实例的电气元器件和设备信息已列出在网络链接1.4中。

渐进设计实例 A.4　直流电动机功率运算放大器速度控制器——完整解决方案

下图显示了渐进设计示例A的功能图(参见1.3节和视频演示1.6)。这里我们将介绍这个设计全部的解决方案。部分细节可在渐进设计实例A.2、A.3和A.5中找到。



PIC16F88 的电路原理图和软件清单如下所示。代码带有注释，其逻辑功能与其功能框图和电路原理图相对应。D-A 转换器 TLC7524C 的具体信息可以在网络链接 7.15 中找到。




```
' poweramp.bas (PIC16F88 microcontroller)

' Design Example
' Power amp motor driver controlled by a potentiometer

' A potentiometer is attached to an A/D input in the PIC. The PIC
' outputs the corresponding voltage as a digital word to a TI TLC7524
' external D/A converter, which is attached to a TI OPA547 power-op-amp
' circuit. The amplifier circuit can provide up to 500 mA of current
' to a DC motor (e.g., R179-6V-ENC-MOTOR)

' Configure the internal 8MHz internal oscillator
DEFINE OSC 8
OSCCON.4 = 1 : OSCCON.5 = 1 : OSCCON.6 = 1

' Turn on and configure AN1 (the A/D converter on pin 18)
ANSEL.1 = 1 : TRISA.1 = 1
ADCON1.7 = 1                ' have the 10 bits be right-justified
DEFINE ADC_BITS 10          ' AN1 is a 10-bit A/D

' Define I/O pin names
led Var PORTA.2             ' diagnostic LED
da_cs Var PORTA.3           ' external D/A converter chip select (low: activate)
da_wr Var PORTA.4           ' external D/A converter write (low: write)

' Declare Variables
key_value Var BYTE          ' code byte from the keypad
ad_word Var WORD            ' word from the A/D converter (10 bits padded with 6 0's)
ad_byte Var BYTE            ' byte representing the pot position

' Define constants
blink_pause Con 200         ' 1/5 second (200 ms) pause between LED blinks
```

```
' Initialize I/O
TRISB = 0                 ' initialize PORTB pins as outputs
High da_wr                ' initialize the A/D converter write line
Low da_cs                 ' activate the external D/A converter

' Main program (loop)
main:
    ' Read the potentiometer voltage with the A/D converter
    ADCIN 1, ad_word
    ' Scale the A/D word value down to a byte
    ad_byte = ad_word/4

    ' Send the potentiometer byte to the external D/A
    PORTB = ad_byte
    Low da_wr
    Pauseus 1   ' wait 1 microsec for D/A to settle
    High da_wr

    ' Blink the LED to indicate voltage output
    Gosub blink

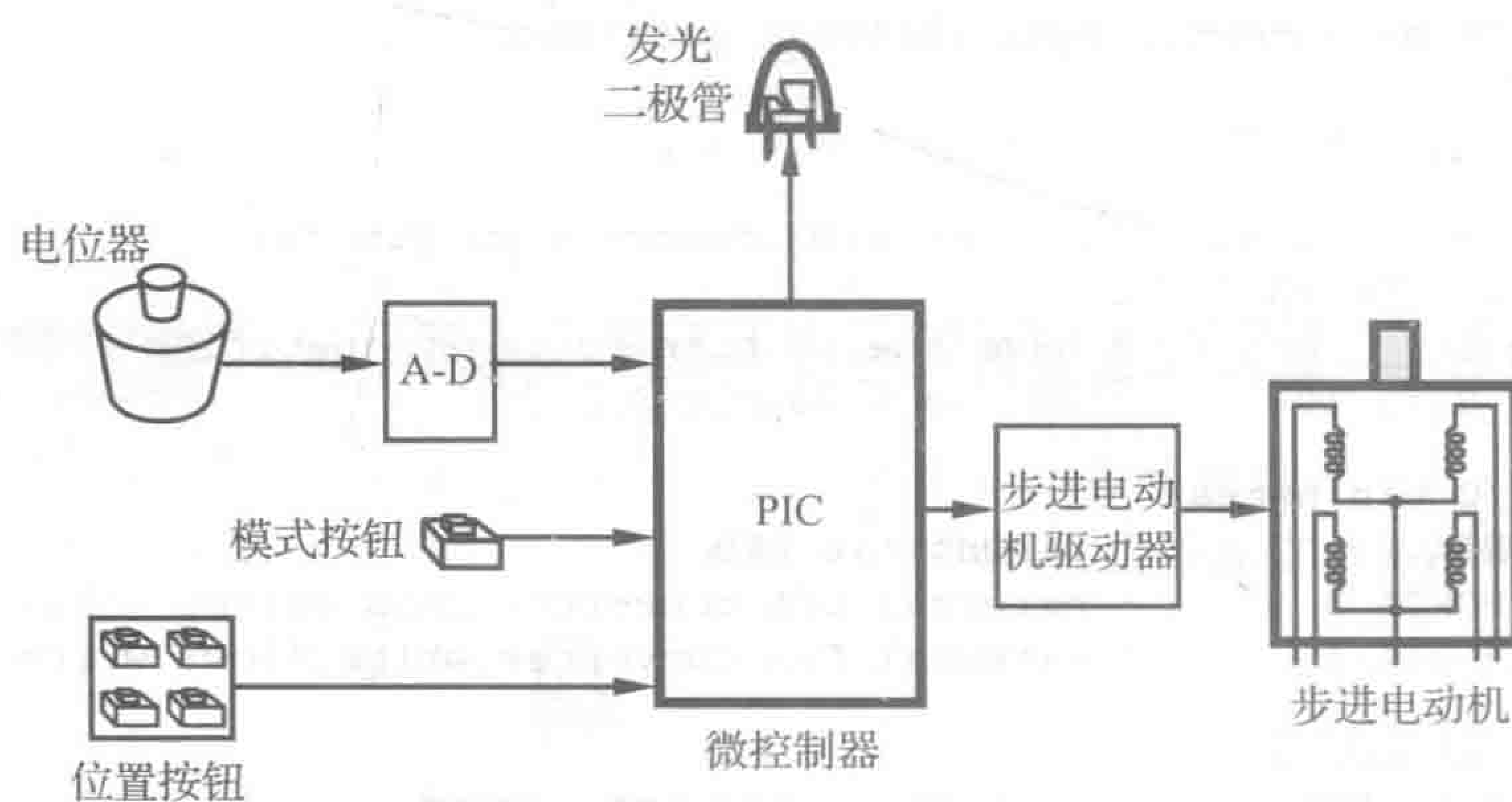
Goto main   ' continue polling keypad buttons

End   ' end of main program

' Subroutine to blink the speed control indicator LED
blink:
        Low led
        Pause blink_pause
        High led
        Pause blink_pause
Return
```

渐进设计实例 B.2　步进电动机位置和速度控制器——完整解决方案

下图显示了渐进设计实例 B 的功能框图(参见 1.3 节和视频演示 1.7)。此处给出其完整的解决方案。



电路原理图和程序清单如下所示。代码带有注释，其逻辑功能与功能框图和电路原理图相对应。为步进电动机产生正确的相序(见渐进设计实例 B.3)的专用集成电路 EDE1200 来自 E-Lab 公司(见网络链接 7.16)。




```
' stepper.bas (PIC16F84 microcontroller)

' Design Example
' Position and Speed Control of a Stepper Motor

' Four pushbutton switches are used to index to four different
' positions (0, 45, ' 90, and 180 degrees). Another pushbutton switch
' is used to toggle in and out of speed control mode (indicated by
' an LED). When in speed control mode, a potentiometer is used to
' control the speed. When to the right of the center position,
' the motor is turned CW at a speed proportional to the pot position.
' The motor turns CCW for pot positions to the left of center. The pot
' position is read from an external A/D converter (National
' Semiconductor ADC0831). The PIC retrieves the bits from the A/D
' converter via a clock signal generated by the PIC. The stepper
' motor is controlled via an E-lab EDE1200 unipolar driver IC and
' a ULN2003A Darlington driver.

' Define I/O pin names
led Var PORTB.0             ' speed control indicator LED
AD_start Var PORTB.1        ' A/D converter conversion start bit
                            ' (must be held low during A/D conversion)
AD_data Var PORTB.2         ' A/D converter data line
                            ' (for serial transmission of data bits)
AD_clock Var PORTB.3        ' A/D converter clock signal (400 kHz maximum)
P1 Var PORTA.2              ' position 1 NO button (0 degrees)
P2 Var PORTA.3              ' position 2 NO button (45 degrees)
P3 Var PORTA.4              ' position 3 NO button (90 degrees)
P4 Var PORTA.1              ' position 4 NO button (180 degrees)
SPD Var PORTA.0             ' speed control NO button to toggle speed control mode
motor_dir Var PORTB.6       ' stepper motor direction bit (0:CW 1:CCW)
motor_step Var PORTB.5      ' stepper motor step driver (1 pulse = 1 step)

' Declare Variables
motor_pos Var BYTE          ' current angle position of the motor (0, 45, 90, or 180)
new_motor_pos Var Byte      ' desired angle position of the motor
delta Var BYTE              ' required magnitude of angular motion required
```

```
num_steps Var BYTE          ' number of steps required for the given angular motion
step_period Var BYTE        ' millisecond width of step pulse (1/2 of period)
i Var Byte                  ' counter used for For loops
AD_value Var BYTE           ' byte used to store the 8-bit value from the A/D converter
AD_pause Var BYTE           ' clock pulse width for the A/D converter
blink_pause Var BYTE        ' millisecond pause between LED blinks
bit_value Var BYTE          ' power of 2 value for each bit used in the A/D conversion

' Define Constants
CW Con 0                    ' clockwise motor direction
CCW Con 1                   ' counterclockwise motor direction

' Initialize I/O and variables
TRISA = $FF                 ' configure all PORTA pins as inputs
TRISB = %00000100           ' configure all PORTB pins as outputs except RB2
High AD_start               ' disable A/D converter
Low motor_step              ' start motor step signal in low state
motor_pos = 0               ' assume the current position is the 0 degree position
step_period = 10            ' initial step speed (1/100 second between steps)
AD_pause = 10               ' 10 microsecond pulsewidth for the A/D clock
blink_pause = 200           ' 1/5 second pause between LED blinks

' Blink the speed control LED to indicate start-up
Gosub blink : Gosub blink

' Wait for a button to be pressed (i.e., polling loop)
main:
       If (P1 == 1) Then
               ' Move motor to the 0 degree position
               new_motor_pos = 0
               Gosub move
       Else
       If (P2 == 1) Then
               ' Move motor to the 45 degree position
               new_motor_pos = 45
               Gosub move
       Else
       If (P3 == 1) Then
               ' Move motor to the 90 degree position
               new_motor_pos = 90
               Gosub move
       Else
       If (P4 == 1) Then
               ' Move motor to the 180 degree position
               new_motor_pos = 180
               Gosub move
       Else
       If (SPD == 1) Then
               ' Enter speed control mode
               Gosub speed
       EndIf : EndIf : EndIf : EndIf : EndIf
Goto main      ' continue polling buttons

End ' end of main program

' Subroutine to blink the speed control indicator LED
blink:
       High led
       Pause blink_pause
       Low led
       Pause blink_pause
Return
```

```
' Subroutine to move the stepper motor to the position indicated by motor_pos
' (the motor step size is 7.5 degrees)
move:
    ' Set the correct motor direction and determine the required displacement
    If (new_motor_pos > motor_pos) Then
        motor_dir = CW
        delta = new_motor_pos - motor_pos
    Else
        motor_dir = CCW
        delta = motor_pos - new_motor_pos
    EndIf

    ' Determine the required number of steps (given 7.5 degrees per step)
    num_steps = 10*delta / 75

    ' Step the motor the appropriate number of steps
    Gosub move_steps

    ' Update the current motor position
    motor_pos = new_motor_pos
Return

' Subroutine to move the motor a given number of steps (indicated by num_steps)
move_steps:
    For i = 1 to num_steps
        Gosub step_motor
    Next
Return

' Subroutine to step the motor a single step (7.5 degrees) in the motor_dir
'   direction
step_motor:
     Pulsout motor_step, 100*step_period     ' (100 * 10microsec = 1 millisec)
     Pause step_period
     ' Equivalent code:
       ' High motor_step
       ' Pause step_period
       ' Low motor_step
       ' Pause step_period
Return

' Subrouting to poll the POT for speed control of the stepper motor
speed:
     ' Turn on the speed control LED indicator
     High LED

     ' Wait for the SPEED button to be released
     Gosub button_release

     ' Polling loop for POT speed control
     pot_speed:
        ' Check if the SPEED button is down
       If (SPD == 1) Then
          ' Wait for the SPEED button to be released
          Gosub button_release

          ' Turn off the speed control LED indicator
          Low led

          ' Assume the new position is the new 0 position
          motor_pos = 0

          ' Exit the subroutine
          Return
       EndIf

       ' Sample the POT voltage via the A/D converter
       Gosub get_AD_value
```

```
        ' Adjust the motor speed and direction based on the POT value and
        '   step the motor a single step.
        '   Enforce a deadband at the center of the range
        '   Have the step period range from 100 (slow) to 1 (fast)
        If (AD_value > 150) Then
            motor_dir = CW
            step_period = 100 - (AD_value - 150)*99/(255 - 150)
            Gosub step_motor
        Else
            If (AD_value < 100) Then
                motor_dir = CCW
                step_period = 100 - (100 - AD_value)*99/100
                Gosub step_motor
            EndIf
        EndIf

    ' Continue polling
    goto pot_speed

Return ' end of subroutine, but not reached (see the SPD If statement above)

' Subroutine to wait for the speed control button to be released
button_release:
    Pause 50    ' wait for switch bounce to settle
    While (SPD == 1) : WEND
    Pause 50    ' wait for switch bounce to settle
Return

  ' Subroutine to sample the POT voltage from the A/D converter
  '   The value (0 to 255) is returned in the variable AD_value and corresponds
  '   to the original 0 to 5V analog voltage range.
  get_AD_value:
     ' Initialize the A/D converter
     Low AD_clock            ' initialize the clock state
     Low AD_start            ' enable the A/D converter
    Gosub pulse_clock        ' send initialization pulse to A/D clock

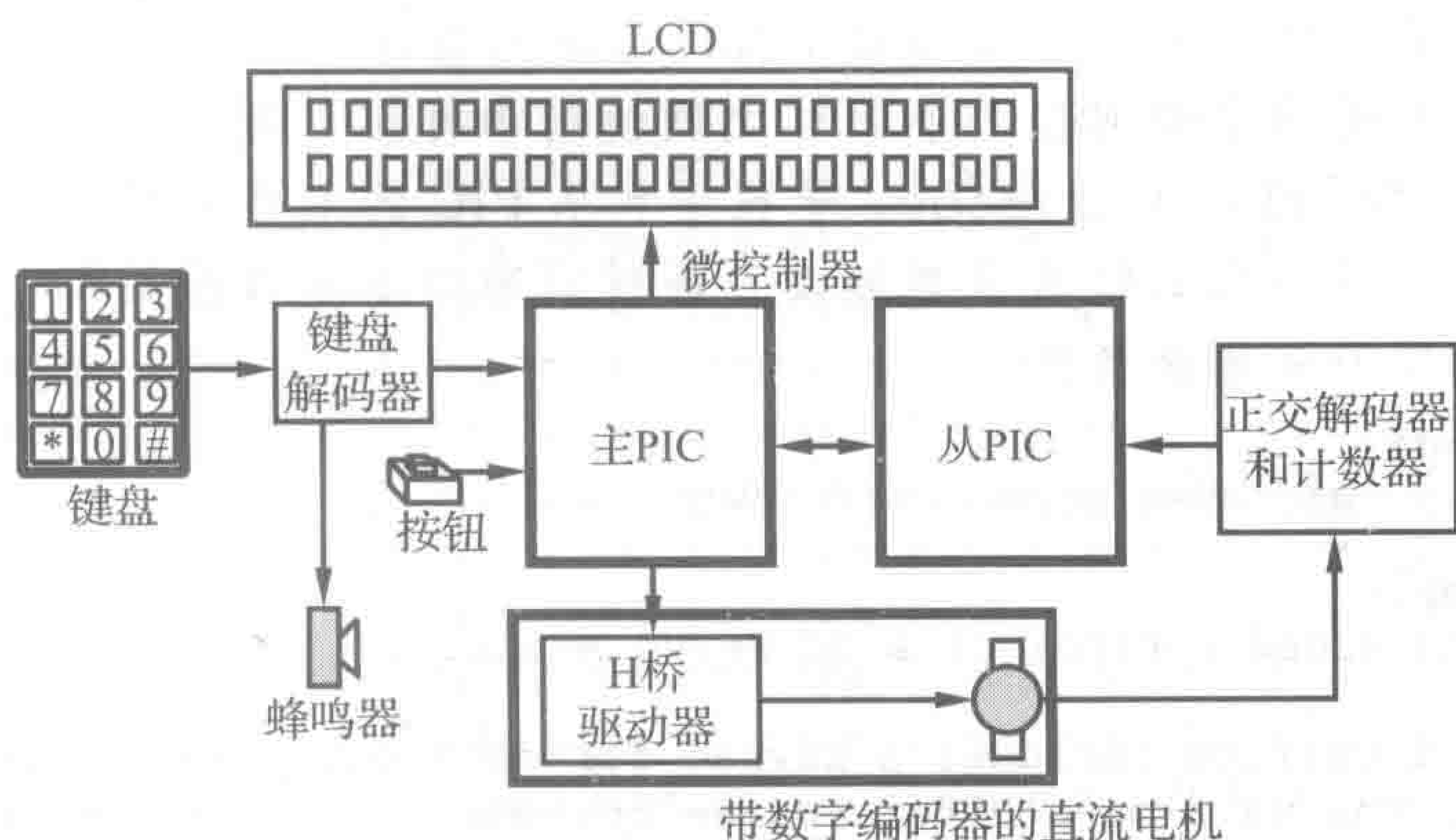
     ' Get each converted bit from the A/D converter (at 50 kHz)
    bit_value = 128          ' value of the MSB
    AD_value = 0
    FOR I = 7 To 0 Step -1 ' for each bit from the MSB to the LSB
        '  Output clock pulse
        Gosub pulse_clock
        AD_value = AD_value + AD_data*bit_value
        bit_value = bit_value / 2
    Next i

    ' Disable the A/D converter
    High AD_start
Return

' Subroutine to send a pulse to the A/D clock line
pulse_clock:
    Pulsout AD_clock, 1 : PauseUS 10    ' 20 microsecond pulse
Return
```

渐进设计实例 C.3 直流电动机位置和速度控制器——串行接口的完整解决方案

下图显示了渐进设计实例 C 的功能框图(参见 1.3 节和视频演示 1.8)。在这里讨论的是完整的解决方案。这个解决方案使用两个 PIC 微控制器。完成大部分功能的微控制器称为“主”微控制器；完成次要功能的微控制器称为“从”微控制器，它接收主微控制器的命令，并提供信息给主微控制器。



如下所示为电路原理图和软件清单。代码带有注释，其逻辑功能与功能框图和电路原理图相对应。有两个软件清单，一个是主 PIC(PIC16F88)的，其任务是监控键盘(见渐进设计实例 C.2)、提供一个由菜单驱动的使用 LCD 的用户界面(见渐进设计实例 C.2)和驱动电动机(见渐进设计实例 C.4 和 C.5)。另一个是从 PIC(PIC16F84)的软件清单，它监测电动机轴上的数字编码器传感器的位置信息并传送给主 PIC。

与其他渐进设计实例一样，可以在书中找到不同元器件的设计细节。这个解决方案是一个很好的例子，它讲述了如何在多个 PIC 之间使用串行接口进行通信。用于实现通信的具体代码可以在主 PIC 的 get_encoder 子程序和从 PIC 的主循环程序中找到。发送数据时，主微控制器通过将一根 I/O 线简单地设为高或低来命令从微控制器，另一根 I/O 线则根据标准的串行通信协议接收数据。

master PIC code:

```
' dc_motor.bas (PIC16F88 microcontroller)

' Design Example
' Position and Speed Control of a DC Servo Motor.

'    The user interface includes a keypad for data entry and an LCD for text
'    messages. The main menu offers three options: 1 - position control,
'    2 - speed control, and 3 - position control gain and motor PWM control.
'    When in position control mode, pressing a button moves to indexed positions
'    (1 - 0 degrees, 2 - 45 degrees, 3 - 90 degrees, and 4 - 180 degrees). When
'    in speed control mode, pressing 1 decreases the speed, pressing 2 reverses
'    the motor direction, pressing 3 increases the speed, and pressing 0 starts
'    the motor at the indicated speed and direction. The motor is stopped with
'    a separate pushbutton switch. When in gain and PWM control mode,
'    pressing 1/4 increases/decreases the proportional gain factor (kP)
'    and pressing 3/6 increases/decreases the number of PWM cycles sent
'    to the motor during each control loop update.

'    Pressing the "#" key from the position, speed, or gain menus returns control
'    back to the main menu. E-Lab's EDE1144 keypad encoder is used to detect
'    when a key is pressed on the keypad and transmit data (a single byte per
'    keypress) to the PIC16F88. Acroname's R179-6V-ENC-MOTOR servo motor is
'    used with their S17-3A-LV H-bridge for PWM control. A second PIC (16F84),
'    running dc_enc.bas, is used to communicate to an Agilent HCTL-2016
'    quadrature decoder/counter to track the position of the motor encoder.
'    The 16F88 communicates to the 16F84 via handshake (start) and serial
'    communication lines.

' Configure the internal 8MHz internal oscillator
DEFINE OSC 8
OSCCON.4 = 1 : OSCCON.5 = 1 : OSCCON.6 = 1
' Turn off A/D converters (thereby allowing use of pins for I/O)
ANSEL = 0

' Define I/O pin names
key_serial Var PORTB.0      ' keypad serial interface input
motor_dir Var PORTB.7       ' motor H-bridge direction line
motor_pwm Var PORTB.6       ' motor H-bridge pulse-width-modulation line
stop_button Var PORTB.4     ' motor stop button
enc_start Var PORTB.2       ' signal line used to start encoder data transmission
enc_serial Var PORTA.7      ' serial line used to get encoder data from the 16F84
enc_rst Var PORTB.5         ' encoder counter reset signal (active low)

' Declare Variables
key_value Var BYTE          ' code byte from the keypad
motor_pos Var Word          ' current motor position in degrees
new_motor_pos Var Word      ' desired motor position (set point) in degrees
error Var Word              ' error magnitude between current and desired positions
motor_speed Var BYTE        ' motor speed as percentage of maximum (0 to 100)
motion_dir Var BIT          ' motor direction (1:CW/Forward 0:CCW/Reverse)
on_time Var WORD            ' PWM ON pulse width
off_time Var WORD           ' PWM OFF pulse width
enc_pos Var WORD            ' motor encoder position (high byte and low byte)
i Var Byte                  ' counter variable for FOR loops
kp Var BYTE                 ' proportional gain factor position control
pwm_cycles Var BYTE         ' # of PWM pulses sent during the position control loop

' Define constants
key_mode Con 0              ' 2400 baud mode for serial connection to keypad
```

```
key_1 Con $30             ' hex code for the 1-key on the keypad
key_2 Con $31             ' hex code for the 2-key on the keypad
key_3 Con $32             ' hex code for the 3-key on the keypad
key_4 Con $34             ' hex code for the 4-key on the keypad
key_5 Con $35             ' hex code for the 5-key on the keypad
key_6 Con $36             ' hex code for the 6-key on the keypad
key_7 Con $38             ' hex code for the 7-key on the keypad
key_8 Con $39             ' hex code for the 8-key on the keypad
key_9 Con $41             ' hex code for the 9-key on the keypad
key_star Con $43          ' hex code for the *-key on the keypad
key_0 Con $44             ' hex code for the 0-key on the keypad
key_pound Con $45         ' hex code for the #-key on the keypad
CW Con 1                  ' motor clockwise (forward) direction
CCW Con 0                 ' motor counterclockwise (reverse) direction
pwm_period Con 50         ' period of each motor PWM signal cycle (in microsec)
                          '   (50 microsec corresponds to 20kHz)
enc_mode Con 2            ' 9600 baud mode for serial connection to the encoder IC

' Initialize I/O and variables
TRISB.6 = 0               ' configure H-bridge DIR pin as an output
TRISB.7 = 0               ' configure H-bridge PWM pin as an output
motion_dir = CW           ' starting motor direction: CW (forward)
motor_pos = 0             ' define the starting motor position as 0 degrees
motor_speed = 50          ' starting motor speed = 50% duty cycle
kp = 50                   ' starting proportional gain for position control
pwm_cycles = 20           ' starting # of PWM pulses sent during the
                          '   position control loop
Low motor_pwm             ' make sure the motor is off to begin with
Low enc_start             ' disable encoder reading to begin with
Gosub reset_encoder       ' reset the encoder counter

' Wait 1/2 second for everything (e.g., LCD) to power up
Pause 500

' Receive dummy byte from the PIC16F84 to ensure proper communication
SERIN enc_serial, enc_mode, key_value

' Wait for a keypad button to be pressed (i.e., polling loop)
Gosub main_menu      ' display the main menu on the LCD
main:
     Serin key_serial, key_mode, key_value
     If (key_value = key_1) Then
         Gosub reset_encoder
         Gosub position
     Else
     If (key_value = key_2) Then
         motor_speed = 50    ' initialize to 50% duty cycle
         Gosub speed
     Else
     If (key_value = key_3) Then
         Gosub adjust_gains
     Endif : Endif : Endif
Goto main     ' continue polling keypad buttons

End ' end of main program

' Subroutine to display the main menu on the LCD
main_menu:
     Lcdout $FE, 1, "Main Menu:"
     Lcdout $FE, $C0, "1:pos. 2:speed 3:gain"
Return
```

```
' Subroutine to reset the motor encoder counter to 0
reset_encoder:
     Low enc_rst       ' reset the encoder counter
     High enc_rst      ' activiate the encoder counter
Return

' Suroutine for position control of the motor
position:
' Display the position control menu on the LCD
     Lcdout $FE, 1, "Position Menu:"
     Lcdout $FE, $C0, "1:0 2:45 3:90 4:180 #:<"

     ' Wait for a keypad button to be pressed
     Serin key_serial, key_mode, key_value

     ' Take the appropriate action based on the key pressed
     If (key_value == key_1) Then
        new_motor_pos = 0
     Else
If (key_value == key_2) Then
    new_motor_pos = 45
Else
If (key_value == key_3) Then
    new_motor_pos = 90
Else
If (key_value == key_4) Then
    new_motor_pos = 180
Else
If (key_value == key_pound) Then
    Gosub main_menu
    Return
Else
    Goto position
Endif : Endif : Endif : Endif : Endif

' Position control loop
While (stop_button == 0)      ' until the stop button is pressed
    ' Get the encoder position (enc_pos)
    Gosub get_encoder

    ' Calculate the error signal magnitude and sign and set the motor direction
    ' Convert encoder pulses to degrees.  The encoder outputs 1230 pulses
    '    per 360 degrees of rotation
    motor_pos = enc_pos * 36 / 123
    If (new_motor_pos >= motor_pos) Then
      error = new_motor_pos - motor_pos
      motor_dir = CW
    Else
      error = motor_pos - new_motor_pos
      motor_dir = CCW
    Endif

    ' Set the PWM duty cycle based on the current error
    If (error > 20) Then     ' use maximum speed for large errors
        motor_speed = kp
    Else
        ' Perform proportional position control for smaller errors
        motor_speed = kp * error / 20
    Endif

    ' Output a series of PWM pulses with the speed-determined duty cycle
    Gosub pwm_periods         ' calculate the on and off pulse widths
    For I = 1 to pwm_cycles
        Gosub pwm_pulse       ' output a full PWM pulse
    Next I
```

```
' Display current position and error on the LCD
Lcdout $FE, 1, "pos:", DEC motor_pos, " error:", DEC error
Lcdout $FE, $C0, "exit: stop button"

Wend

Goto position      ' continue the polling loop
Return             ' end of subroutine, not reached (see the #-key If above)

' Subroutine to get the encoder position (enc_pos) from the counter
get_encoder:

     ' Command the PIC16F84 to transmit the low byte
     High enc_start

     ' Receive the high byte
     SERIN enc_serial, enc_mode, enc_pos.HighBYTE

     ' Command the PIC16F84 to transmit the high byte
     Low enc_start

     ' Receive the low byte
     SERIN enc_serial, enc_mode, enc_pos.LowBYTE
Return

' Subroutine to calculate the PWM on and off pulse widths based on the desired
'    motor speed (motor_speed)
pwm_periods:
     ' Be careful to avoid integer arithmetic and
     '   WORD overflow [max=65535] problems
     If (pwm_period >= 655) Then
         on_time = pwm_period/100 * motor_speed
         off_time = pwm_period/100 * (100-motor_speed)
     Else
         on_time = pwm_period*motor_speed / 100
         off_time = pwm_period*(100-motor_speed) / 100
     Endif
Return

' Subroutine to output a full PWM pulse based on the data from pwm_periods
pwm_pulse:
     ' Send the ON pulse
     High motor_pwm
     Pauseus on_time

     ' Send the OFF pulse
     Low motor_pwm
     Pauseus off_time
Return

' Subroutine for speed control of the motor
speed:
     ' Display the speed control menu on the LCD
     Gosub speed_menu

     ' Wait for a keypad button to be pressed
     Serin key_serial, key_mode, key_value

     ' Take the appropriate action based on the key pressed
     If (key_value == key_1) Then
         ' Slow the speed by 10%
         If (motor_speed > 0) Then       ' don't let speed go negative
             motor_speed = motor_speed - 10
         Endif
```

```
    Else
    If (key_value == key_2) Then
        ' Reverse the motor direction
        motion_dir = ~motion_dir
    Else
    If (key_value == key_3) Then
        ' Increase the speed by 10%
        If (motor_speed < 100) Then ' don't let speed exceed 100
            motor_speed = motor_speed + 10
        EndIf
    Else
    If (key_value == key_pound) Then
        Gosub main_menu
        Return
    Else
    If (key_value == key_0) Then
        ' Run the motor until the stop button is pressed
        Gosub run_motor
    Else
        ' Wrong key pressed
        Goto speed
    Endif : Endif : Endif : Endif : Endif
Goto speed     ' continue the polling loop
Return         ' end of subroutine, not reached (see the #-key If above)

' Subroutine to display the speed control menu on the LCD
speed_menu:
    Lcdout $FE, 1, "speed:", DEC motor_speed, " dir:", DEC motion_dir
    Lcdout $FE, $C0, "1:- 2:dir 3:+ 0:start #:<"
Return

' Subroutine to run the motor at the desired speed and direction until the
'   stop button is pressed. The duty cycle of the PWM signal is the
'   motor_speed percentage
run_motor:
    ' Display the current speed and direction
    Lcdout $FE, 1, "speed:", DEC motor_speed, " dir:", DEC motion_dir
    Lcdout $FE, $C0, "exit: stop button"

    ' Set the motor direction
    motor_dir = motion_dir

    ' Output the PWM signal
    Gosub pwm_periods       ' calculate the on and off pulse widths
    While (stop_button == 0)      ' until the stop button is pressed
      Gosub pwm_pulse       ' send out a full PWM pulse
    Wend

    ' Return to the speed menu
    Gosub speed_menu
Return

' Subroutine to wait for the stop button to be pressed and released
' (used during program debugging)
button_press:
    While (stop_button == 0) : Wend   ' wait for button press
    Pause 50                          ' wait for switch bounce to settle
    While (stop_button == 1) : Wend    wait for button release
    Pause 50                          ' wait for switch bounce to settle
Return

' Subroutine to allow the user to adjust the proportional and derivative
'   gains used in position control mode
adjust_gains:
    ' Display the gain values and menu on the LCD
    Gosub gains_menu
```

```
' Wait for a keypad button to be pressed
Serin key_serial, key_mode, key_value

' Take the appropriate action based on the key pressed
If (key_value == key_1) Then
   ' Increase the proportional gain by 10%
   If (kp < 100) Then
      kp = kp + 10
   Endif
Else

    If (key_value == key_4) Then
       ' Decrease the proportional gain by 10%
       If (kp > 0) Then     ' don't allow negative gain
          kp = kp - 10
       Endif
    Else
    If (key_value == key_3) Then
       ' Increase the number of PWM cycles sent each position control loop
       pwm_cycles = pwm_cycles + 5
    Else
    If (key_value == key_6) Then
       ' Decrease the number of PWM cycles sent each position control loop
       If (kp > 5) Then     ' maintain positive number of pulses
          pwm_cycles = pwm_cycles - 5
       Endif

    Else
    If (key_value == key_pound) Then
       Gosub main_menu
       Return
    Else
       Goto adjust_gains
    Endif : Endif : Endif : Endif : Endif

Goto adjust_gains      ' continue the polling loop
Return                 ' end of subroutine, not reached (see the #-key If above)

' Subroutine to display the position control gain, the number of PWM
'    cycles/loop, and the adjustment menu on the LCD
gains_menu:
    Lcdout $FE, 1, "kp:", DEC kp, " PWM:", DEC pwm_cycles
    Lcdout $FE, $C0, "1:+P 4:-P 3:+C 6:-C #:<"
Return
```

slave PIC code:

```
' dc_enc (PIC16F84 microcontroller)

' Design Example
' Position and Speed Control of a dc Servo Motor.

' Slave program to send encoder data, upon request, to the a PIC16F88
' microcontroller running dc_motor.bas

' Define I/O pin names and constants
enc_start Var PORTA.0        ' signal line used to start encoder data transmission
enc_serial Var PORTA.1       ' serial line used to get encoder data from the 16F84
enc_sel Var PORTA.2          ' encoder data byte select (0:high 1:low)
enc_oe Var PORTA.3           ' encoder output enable latch signal (active low)
led Var PORTA.4              ' diagnostic LED (open drain output: 1:OC, 0:ground)
enc_mode Con 2               ' 9600 baud mode for serial connection to encoder IC
blink_pause Con 200          ' 1/5 second (200 ms) pause between LED blinks
```

```
' Turn off the diagnostic LED
High led

' Wait to ensure the PIC16F88 is initialized
PAUSE 500

' Initialize I/O signals
High enc_oe              ' disable encoder output
Low enc_sel              ' select the encoder counter high byte initially
                         ' (to prevent transparent latch on low byte)

' Blink the LED to indicate proper operation
Gosub blink : Gosub blink : Gosub blink
' Send dummy byte (66) to ensure proper communication
SEROUT enc_serial, enc_mode, [66]
' Main loop
start:
     ' Wait for the start signal from the PIC16F88 to go high
     While (enc_start == 0) : Wend

     ' Enable the encoder output (latch the counter values)
     Low enc_oe

     ' Send out the high byte of the counter
     SEROUT enc_serial, enc_mode, [PORTB]

     ' Wait for the start signal from the PIC16F88 to go low
     While (enc_start == 1) : Wend

     ' Send out the low byte of the counter
     High enc_sel
     SEROUT enc_serial, enc_mode, [PORTB]

     ' Disable the encoder output
     High enc_oe
     Low enc_sel
goto start  ' wait for next request

End     ' end of main program (not reached)

' Subroutine to blink the diagnostic LED on and back off again
blink:
      Low led
      Pause blink_pause
      High led
      Pause blink_pause
Return
```

课堂讨论项目 7.10　**负逻辑 LED**

为什么在渐进设计实例 C.3 的 blink 子程序中使用负逻辑(即低电平使灯打开，高电平使其熄灭)?

7.10　实际应用的注意事项

在本章里，我们学习了如何设计并编写基于微控制器系统的程序。然而，在大多数情况下，构建的电路及软件并不一定就能很好地完成相应的功能。实验练习 9～11 提供了一些帮助您开发必要技能的成功经验。成功设计一个复杂的微控制器系统的最好建议是遵循 7.9 节给出的条理化的设计过程，对于你正在使用的专用开发系统，它有助于你了解和遵循一些详细的过程。网络链接 7.11 提供了应用 PicStart Plus 编程硬件及 PicBasic Pro 编程开发 PIC 微控制器的详细过程。

7.10.1 PIC项目的调试过程

以下给出的检查清单和建议可以用于调试软件，使得电路正常工作：

1. 在整个代码编写和测试之前，始终以一个非常简单的程序开始(如7.5.1节中的flash.bas)以确保PIC系统所有必需的元器件已正确互连，允许PIC运行。

2. 在确保PIC能够正常运行的情况下，每次增加一个功能模块并进行代码测试。换句话说，使软件模块化并进行独立的开发和测试(即不要立即写完整个程序，并期望它能够正常工作)。

3. 在程序运行时，在代码中加入LED来显示输入、输出的状态和程序运行的位置。

4. 了解PIC I/O引脚的不同特征。参考7.8节了解不同的引脚应如何正确接口以完成不同的功能。

5. 注意，在PicBasic Pro语句运行时会完全占用处理器(如SOUND之后的语句只有当SOUND命令完全执行结束后才得以运行)。

6. 如果PIC使用没有内部振荡器(如PIC16F84)，应确保电路有合适的晶振及其电容。如果使用的PIC具有内部振荡器(如微控制器16F88)，应确保程序中包含了必要的初始化代码(请参阅网络链接7.17给出的PIC16F88代码模板)。

7. 下载代码至PIC时，仔细检查配置位的设置，如振荡器、定时器、引脚功能是否正确定义。当PIC重编程时，每次都可手动设置配置(见网络链接7.11中的文档)，否则，就需要如网络链接7.18所示在程序中包含所有的配置代码。

8. 遵循2.10.2节中关于原型电路设计的所有建议。

9. 始终遵循网络链接7.11中的PIC编程过程，确保不错过任何重要的步骤和细节。

更多开发和基于PIC系统调试的建议可以在网络链接7.19中找到，它是过去许多学生完成课程项目设计时的经验教训的总结。

7.10.2 PIC的电源

有许多方法可以为PIC和辅助数字集成电路提供所需的直流电源。如果驱动电压与数字电路的电压相匹配，并且所需电流没有超过电源的能力，那么执行器也可以通过相同的直流电源供电。本节假设使用TTL数字集成电路，它需要采用可调的5V直流电源。如果只使用CMOS器件，则对直流电压的稳压要求会有更少的限制。

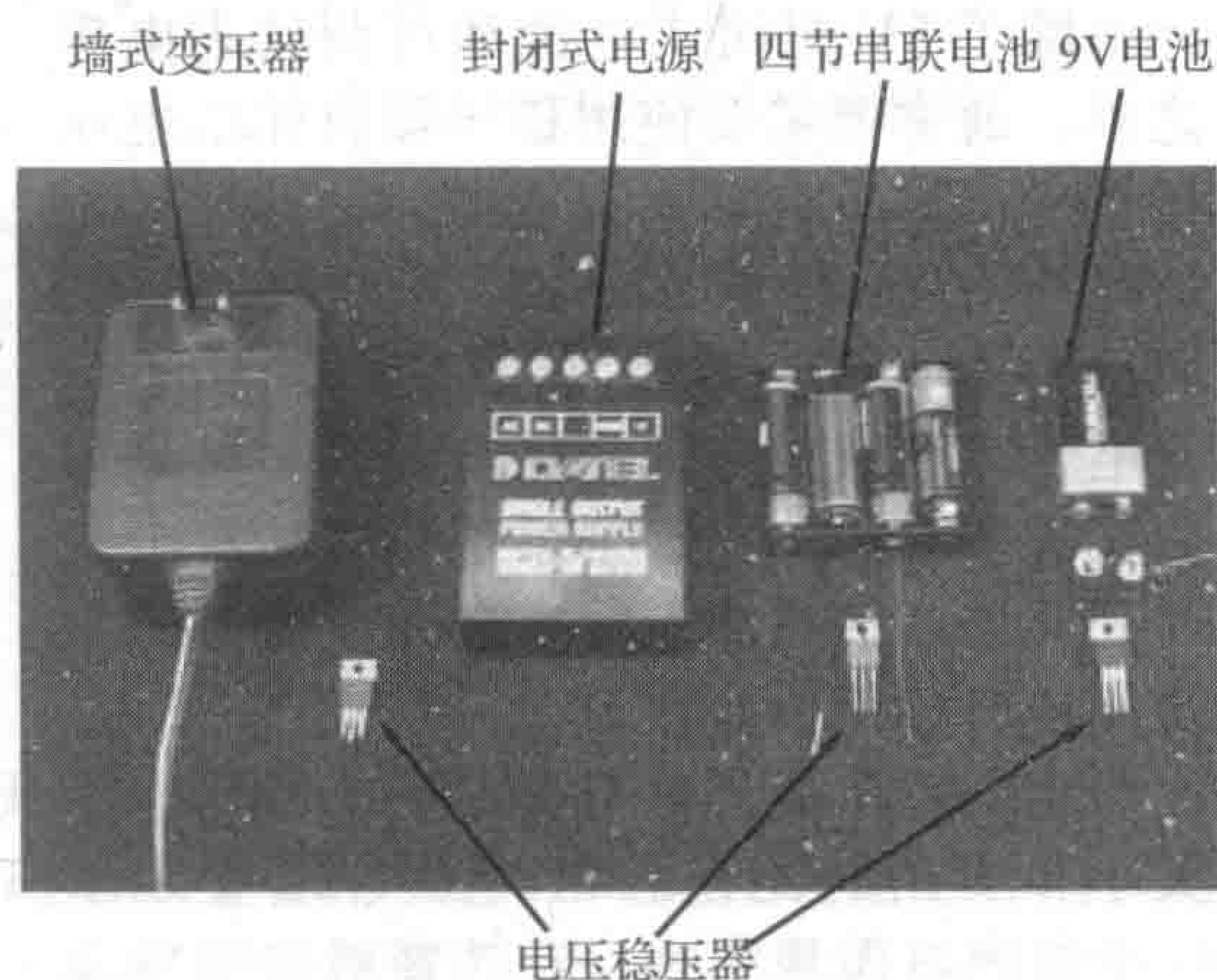


图7-21 低成本的电源选项

图7-21显示了一些低成本的5V电源系统。包括：

1. 6V、9V、12V墙式变压器和5V稳压器
2. 带有5V稳压输出的封闭式交流输入电源
3. 四节AA电池(6V)与5V稳压器串联
4. 带有5V稳压器的9V电池
5. 带有5V稳压器的可充电电池(或电池串联)
6. 一个全功能的仪表电源

其他的替代电源包括：计算机电源或大型电池(如汽车或摩托车上的铅酸电池)，特别在需要高电流的情况下。

墙式变压器(6V、9V、12V)可提供额定的电流输出，但必须与5V稳压器一同使用来获得稳定的输出电压。注意，变压器的额定输出电流要超出(具有合适的安全余量)电路和执行器所需的最大电流。封闭式交流输入电源通常可在其额定电流范围内提供一个或多个

直流稳压输出，如果需要 5V 的输出，则不需要稳压器。4 节 AA 电池可以串联在一起提供 6V 输出，然后使用稳压器调节到 5V。9V 电池也必须连接到一个 5V 稳压器。7.10.3 节给出了更多不同类型的电池信息及其特点。一般来说，电磁线圈和电动机等设备，以及大电流 LED 所需的驱动电流较大，所以需要检查所选电池能否提供足够的电源。另一方面，数字电路通常消耗的电流非常少。

图 7-22 显示了一个全功能仪表电源的示例。该电源(HP6235A)带有 3 路可调电压的输出电源，且每路电源的额定电流都是独立设置的。全功能仪表电源提供了最简单的解决方案，但这些设备昂贵、沉重，而且通常是非便携式的。

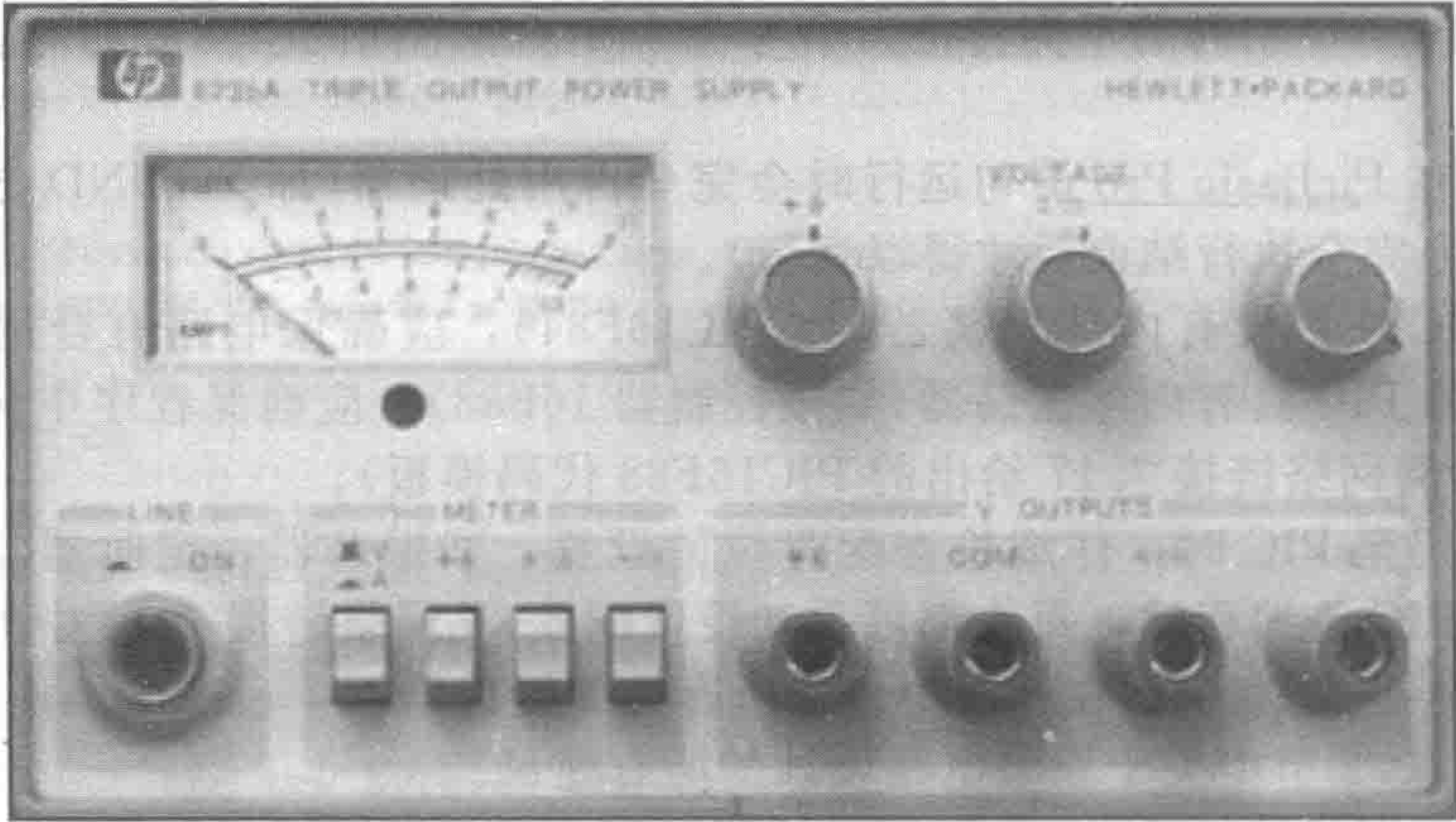


图 7-22　一个全功能仪表电源

除了 5V 封闭式电源和可调仪表电源之外，通常都需要使用稳压器将输出电压调整至 5V。如果系统是由 CMOS 搭建的，则直流电压的调节不是必需的。图 7-23 给出了一个标准的 7805 5V 稳压器电路，注意其与未稳压电源和系统是如何正确连接的。在这个系统中必须有电源和公共地，散热器上的安装孔使得与公共地相连变得十分方便。

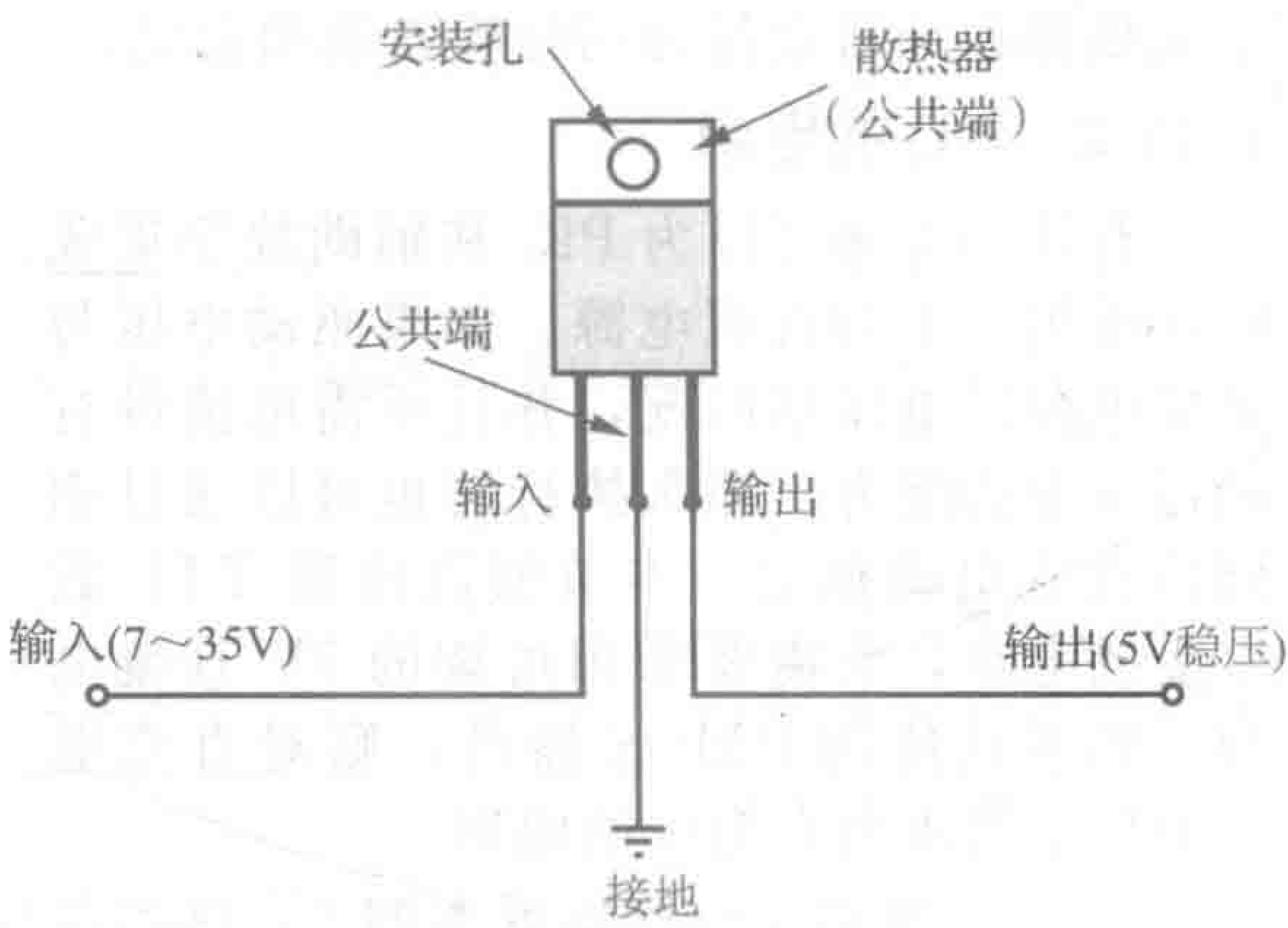


图 7-23　7805 电压稳压器的连接

表 7-7 提供了各种电源的额定电流、大小和费用的比较总结。图 7-24 显示了一个封闭电源规格表。在选择或购买电源前，重要的是首先审查其规格，尤其是额定电流(此例中额定电流为 2.5A)。

表 7-7　5V 电源选择总结

设备	典型电流	尺寸	价格
仪表电源	1~5A	大	非常昂贵(约为 1000 美元)但功能丰富
小型开放或封闭式电源	1~10A	中	中等(20~100 美元)
墙式变压器	1A	小	便宜
9V 电池	100mA	小	便宜
4 节 AA 电池	100mA	小	便宜
可充电电池	见 7.10.3 节	小	适中

7.10.3 电池特性

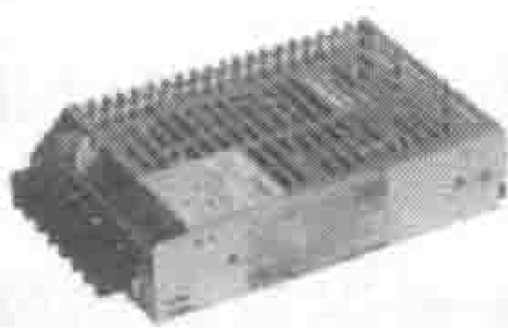
本节提供了一些选用电池作为电源时所需关注的重要事项。对于电池来说，其最重要的规格(除了其额定电压外)是其**安时容量**。该参数定义为电池在一个小时内用完其所有电量所能提供的电流。电池所能输出的电流受限于其**等效串联电阻**，这是电池的内部电阻，可以视为与一个“理想电压源”串联。负载电流乘以内阻将会产生压降，从而降低电池的有效输出电压。此外，内阻将带来功率消耗，在高电流状态下可能会产生非常大的热量。

电池由许多单元组成，每个单元由于具有电化学结构，所以都可提供电压和电流。电池内部单元之间可以通过串联或并联组合来提高电流和电压。由于其化学类型不同，所以电池单元的电压也是不相同的。通常，**原电池**是一次性的且不可充电。如果设备是间断供电的或者所需电流很小，那么采用原电池供电是一个好的选择。**二次电池**是可充电的，允许重复使用。使用较为频繁或所需电流较大的设备可选择二次电池。

电池**放电曲线**对确定其输出电压的稳定性很重要。图 7-25 显示了一个典型的放电曲线，放电曲线中的平台越宽其寿命越长。

设计师在选择机电设计的电源时，必须考虑的重要因素包括：

- 负载所需的电压
- 负载所需的电流
- 系统的工作周期
- 成本
- 尺寸和重量(特定的能源)
- 可充电性



开关电源16W，直流5V/2.5A

Jameco #208952

制造编号 # PRK15U-0512W

16W开关电源

双输出

- 输出电压：+5V直流@2.5A，+12V直流@0.7A
- 功率：16.0W
- 输入电压：120VAC@50～60Hz
- 大小：4.6″(长)×3.2″(宽)×1.1″(高)
- 安装孔：4.0″(长)×2.5″(宽)×0.08″(直径)
- 功率密度：0.99W/in³(1in³=1.638 71×10⁻⁵m³)
- 负载调整率：±1%
- 线性调整率：±0.4%
- 浪涌电流：12A@120V交流
- 漏电流：1.0mA@240V
- 上升时间：100ms
- 维持时间：20ms
- 振动：10～55Hz，20G
- 电压调节：5%
- 效率：64%
- 重量：0.51bs
- UL/CAS认证

图 7-24 封闭框架式电源规格



图 7-25 电池放电曲线

如表 7-8 所示，电池的化学作用决定了其开路电压。具有高峰值电流需求的设备通常适合使用铅酸或镍镉类电池。如果设备大多数时间处于备用状态，则碱性电池更合适。若电池可能是机电一体化系统中最重的设备，因此，很轻的锂离子(锂)和锂聚合物电池可能是一个好的选择。锂化学电池是所有电池中单位重量内提供能量最高的电池。

大多数可充电电池在近百次往复充电后仍然具有很好的性能。它们比常见的原电池更为昂贵。镍氢电池在投入使用之前最好深度放电数次以达到最佳性能。镍镉电池受到“记忆”效应的困扰，其电池容量也会随着时间而减少。这是由于电池的浅充电循环引起的，即电池部分放电然后反复完全充电。有时，可以定期给电池深度放电以达到其最佳性能。

在网络链接 7.20 和 7.21 中可以找到更多的电池信息资源。同时网络链接 7.22 提供了一些有效利用电池的实用性建议。

表 7-8 不同类型电池的特性

类型	电压(开路)	类型	典型安时容量	内阻/Ω
9V(持续供电型)	9V	原电池	0.30@1mA 0.15@10mA	35
9V 碱性	9V	原电池	0.60@25mA	2

（续）

类型	电压(开路)	类型	典型安时容量	内阻/Ω
9V 锂电池	9V	原电池	1.0@25mA	18
碱性 D	1.5V	原电池	17.1@25mA	0.1
			0.95@80mA	
碱性 C	1.5V	原电池	7.9@25mA	0.2
碱性 AA	1.5V	原电池	2.7@25mA	0.4
碱性 AAA	1.5V	原电池	1.2@25mA	0.6
BR-CPCMF-Li	3V	原电池	5.0@5mA	
CR-V3MnLi	3V	原电池	3.0@100mA	
镍镉电池 D	1.3V	二次电池	4.0@800mA	0.009
			3.5@4A	
9V 镍镉电池	8.1V	二次电池	0.1@10mA	0.84
铅酸 D	2.0V	二次电池	2.5@25mA	0.006
			2.0@1A	
镍氢电池 AAA	1.2V	二次电池	0.55@200mA	
镍氢电池 AA	1.2V	二次电池	1.3@200mA	
镍氢电池 C	1.2V	二次电池	3.5@200mA	
镍氢电池 D	1.2V	二次电池	7.0@200mA	
9V 镍氢电池	8.4V	二次电池	0.13@200mA	
ML2430MnLi	3V	二次电池	0.12@300mA	
锂离子	3.7V	二次电池	0.76@200m	

7.10.4 其他项目原型和设计方面的注意事项

基本原型电路的组装和故障排除建议可参见 2.10.2 节。7.10.1 节为调试 PIC 微微控制器电路的相关建议。以下是其他一些实用的项目原型和设计方面的建议：

- 订购 IC 时，应选择 DIP(双列直插式)封装，而非表面贴装(SOP)的形式。DIP 芯片适合在面包板上使用。表面贴装集成芯片则需要印制电路板(PCB)和特殊的焊接设备。
- 确保选择的电源可以为整个设计提供足够的电流。如果有必要的话，信号和功率电路分别使用独立的电源。
- 使用面包板时需要小心，因为其连接可能是不可靠的并且基板附加了额外的电容到电路中。硬连接和焊接板或印制电路板则要可靠得多(有关更多信息参见 2.10.4 节)。对于焊接的原型电路，所有集成电路建议使用插座连接，以防止焊接时造成不必要的损害，同时也方便替换芯片。此外，如果有一个工作的试验电路，建议焊接板采用同样的元器件(如果可能)，不要从一个工作的原型电路拆卸元器件使用，以免焊接时出现问题或损坏。
- 对没有内置输出电容的电源(如电池、墙式变压器、稳压电源)在主电源和地线之间增加存储电容(如 100μF)以最小化输出电流尖峰时的电压波动。同时，在所有单个 IC 的电源和地线间使用“旁路”或“解耦”电容(如 0.1μF)以抑制电流和电压尖峰。
- 小心处理接地和电磁干扰(EMI)。2.10.6 节给出了各种方法来降低 EMI，特别是使用光隔离器、单点接地、同轴电缆或双绞线以及解耦电容等。
- 不要让 IC 引脚悬空(特别是 CMOS 器件)。换句话说，连接所有引脚至信号或电源

或地。例如，不要假想不连接微控制器的复位引脚，微控制器会自行复位运行。微控制器的复位引脚应连至+5V(低有效复位)或地(高有效复位)。不连接时，复位引脚的状态可能是不确定的。

- 注意数字电路中的开关抖动，所以需要添加防抖电路或使用软件来消除抖动(见6.10.1节)。
- 在电动机、电磁线圈等高电感设备切换电源时应使用续流二极管(见3.3节)。
- 当数字输出所需电流很大时，需要使用缓冲器、线驱动器或反相器。
- 使用施密特触发器(见6.12.2节)对噪声数字输入进行处理(如霍尔效应接近传感器或光遮断器)。
- 使用共发射极晶体管(即把负载放在高端)，以避免电压偏置和发射器性能退化(见3.4.2节)。
- 小心区分并正确接口器件的集电极开路或开漏输出(参见6.11.2节)(如PIC16F84的引脚RA4)。
- 对可反转直流电动机，采用现成的商用H桥驱动器(如美国国家半导体公司的LMD18200)而非自行搭建。更多信息参见网络链接10.3。

问题和练习

7.1 整理并完整回答课堂讨论项目7.2。

7.2 编写一个汇编语言程序，以0.5Hz的频率打开和关闭一个LED。画出解决方案所需的原理图。

7.3 编写一个PicBasic Pro程序，当按钮开关按下时，以1Hz的频率打开和关闭一个LED。画出解决方案所需的原理图。

7.4 编写一个执行Pot语句功能(见课堂讨论项目7.7)的PicBasic Pro程序。

7.5 编写一个PicBasic Pro子程序，实现RB0引脚输入的软件防抖动(见课堂讨论项目7.8)。代码应能等待按钮开关按下和释放且不受开关抖动的影响。

7.6 微控制器通常不包括D-A转换器，但是可以很容易地创建一个使用单一数字I/O引脚的简易版本，即输出一个宽度可变的脉冲序列至RC电路，更多信息科参考PicBasic Pro编译器手册中的有关PWM语句的文档。编写一个PicBasic Pro子程序，使用RA0引脚输出一个与字节变量digital_value的值(0～255)成正比的恒定电压(0～5V)。该子程序应维持输出电压值约1s。

7.7 对例7.5的安全系统示例，说明如果窃贼触发警报后关上打开的门或窗户会发生什么？考虑所有相关的操作状态，如何改善设计来克服其不足？

7.8 编写一个PicBasic Pro程序来实现例7.9中的安全系统的中断驱动解决方案。

7.9 编写一个PicBasic Pro程序，通过LCD显示电位器的数值百分比。显示的信息应具有pot value=X%的形式，其中X是从0～100的百分数。画出解决方案所需的原理图。

7.10 编写一个PicBasic Pro程序，允许用户通过一个数字键盘输入多位数字(最多5位数)。将#键作为回车键，当输入一个数字后，应将其显示在两行的LCD上，第一个数字出现在第一行，第二个数字出现在第二行，随后的数字随着前面的数字上移至第一行后，仍然显示在第二行。画出解决方案所需的原理图。

7.11 在图7-13中，解释为什么有一个1kΩ的电阻将RA4与5V相连。这种连接方式与直接将RA4与LCD的Vee引脚连接有什么不同(没有电阻或5V连接)？

7.12 应用7.9节给出的设计过程解决问题6.44，认真完成每一步操作。尽可能在软件中实现(如替代触发器)。

7.13 通过修改问题6.58中的需求来解决问题7.12。

7.14 使用PIC16F84和两个7447译码器(见设计实例7.1)来编写一个PicBasic Pro程序，以实现由3个按钮开关控制两位数的计数显示：一个开关复位计数值为0，一个开关使计数值加1，第三个开关使计数值减1。如果计数值小于10，则第一个数字应该是空白的。计数值超过99应重置计数为0，不允许减至0以下。应对开关动作进行防抖动处理，并且防止开关按下时重复计数。使用7.9节给出的设计过程，并显示每一步的结果。

7.15 访问微芯公司网站，选择一个 DIP 封装的闪存型 PIC 微控制器，其至少有 16 根数字 I/O 线和 2 个 A-D 转换器。选择满足需求、成本最低的微控制器，并列出近似成本、I/O 引脚的数量、A-D 转换器的数量(连同它们的分辨率)及引脚总数。

7.16 画出渐进设计实例 A 所有功能的详细流程图。

7.17 画出渐进设计实例 B 中主程序功能的详细流程图(不包括子程序)。

7.18 画出渐进设计实例 B 中 `move` 子程序功能的详细流程图，流程图应包括子程序 `move_steps` 和 `step_motor` 的实现细节。

7.19 画出渐进设计实例 B 中 `speed` 子程序功能的详细流程图，流程图应包括 `get_AD_value` 子程序的细节。

7.20 画出渐进设计实例 C 中 `position` 子程序功能的详细流程图，包括子程序 `get_encoder` 的细节。

7.21 画出渐进设计实例 C 中从 PIC 所有功能的详细流程图。

参考文献

Gibson, G. and Liu, Y., *Microcomputers for Engineers and Scientists,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980.

Herschede, R., "Microcontroller Foundations for Mechatronics Students," master's thesis, Colorado State University, summer 1999.

Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics,* 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

Microchip Technology, Inc., www.microchip.com, 2010.

Microchip Technology, Inc., *PIC16F8X Data Sheet,* Chandler, AZ, 1998.

Microchip Technology, Inc., *MPASM User's Guide,* Chandler, AZ, 1999.

Microchip Technology, Inc., *MPLAB User's Guide,* Chandler, AZ, 2000.

microEngineering Labs, Inc., www.melabs.com, 2010.

microEngineering Labs, Inc., *PicBasic Pro Compiler,* Colorado Springs, CO, 2008.

Motorola Technical Summary, "MC68HC11EA9/MC68HC711EA9 8-bit Microcontrollers," document number MC68HC11EA9TS/D, Motorola Advanced Microcontroller Division, Austin, TX, 1994.

Peatman, J., *Design with Microcontrollers,* McGraw-Hill, New York, 1988.

Predko, M., *Programming and Customizing PICmicro Microcontrollers,* McGraw-Hill, New York, 2001

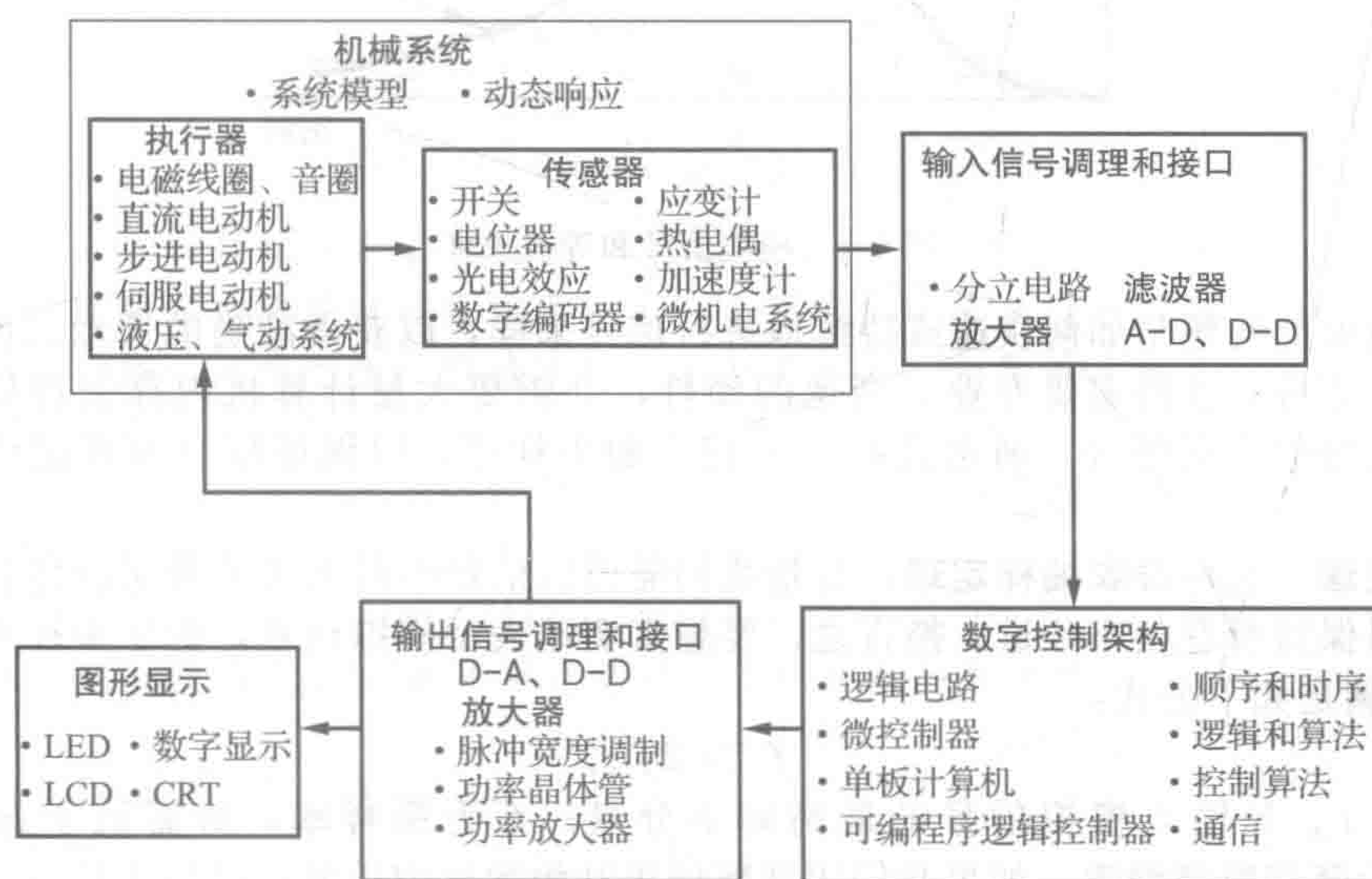
Stiffler, A., *Design with Microprocessors for Mechanical Engineers,* McGraw-Hill, New York, 1992.

Texas Instruments, *TTL Linear Data Book,* Dallas, TX, 1992.

Texas Instruments, *TTL Logic Data Book,* Dallas, TX, 1988.

第8章 数据采集

本章提出了模拟与数字信号相互转换的概念，这些概念对连接数字电路到机电一体化系统的模拟组件是非常重要的。本章也介绍了虚拟仪器的概念，并介绍了LabVIEW软件中的一些实例。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的概念后，能够：

1. 理解怎样适当采集一个信号进行数字处理；
2. 了解数字化数据如何编码；
3. 熟悉A-D转换器的部件；
4. 了解A-D和D-A转换器的功能和识别它们的局限性；
5. 清楚数据采集与控制的商用硬件和软件工具；
6. 了解LabVIEW虚拟仪器编程和数据采集的基本知识；
7. 了解采样率和分辨率对音乐采样的影响。

8.1 引言

微处理器、微控制器、单板计算机和个人计算机广泛应用在机电一体化和测量系统中，了解如何直接访问这些设备周围环境的信息和模拟数据变得越来越重要。图8-1是一个用传感器采集的模拟信号，我们可以采用类似图表记录器的模拟装置记录信号，它可将信号打印在纸上或在示波器上显示。另一选择是使用微处理器或计算机存储数据。这个过程称为计算机**数据采集**，它提供了更紧凑的数据存储(磁场、光学或闪存介质与长卷纸)，更高的数据精度，允许在实时控制系统中使用数据，并能在事件发生很长时间后进行数据处理。

为了将模拟数据输入到数字电路或微处理器中，模拟数据必须转换成编码的数字值。

第一步是在离散的时间间隔上用数值表示信号，这个过程称为**采样**，其结果是由对应于每个样本的离散值组成的**数字化信号**，如图 8-1 所示。因此，数字化信号是一个数值序列，是近似的模拟信号。注意数字之间的时间关系是采样过程的固有特性，不需要单独记录。采样数据点的集合形成一个数据阵列，虽然这种表示不再是连续的，但它可以准确地描述原来的模拟信号。

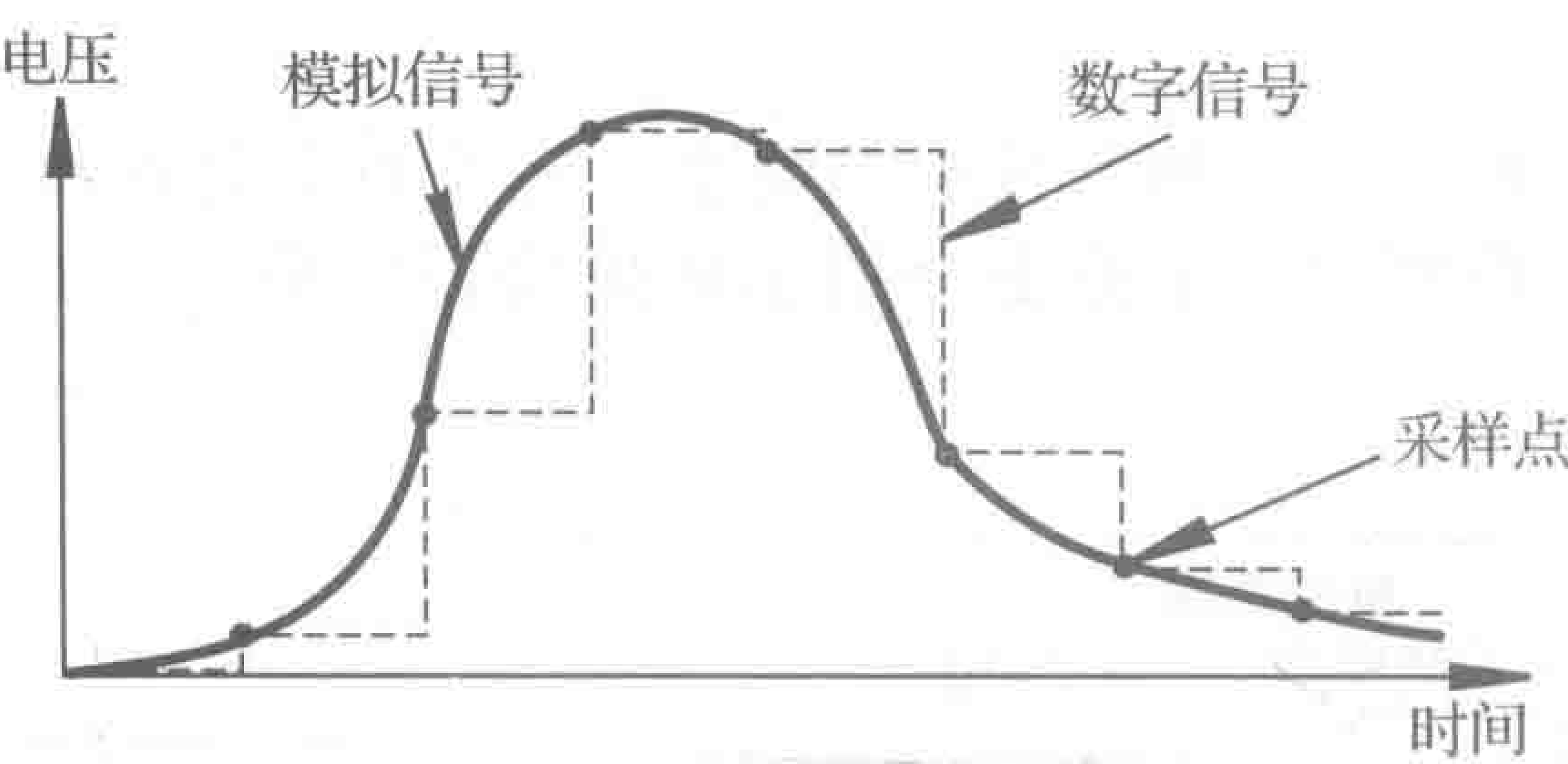


图 8-1 模拟信号和等效采样

一个重要的问题是如何快速或持续地进行信号采样，以获得准确的表示。如果要尽可能快地采集信号，这将需要专业、高速的硬件，并需要大量计算机内存去存储数据。因此，对于特定的应用场合，通常选择一个较小的采样率，以保证所有重要的信号信息不丢失。

采样定理，又称**香农抽样定理**，是指我们需要以信号中最大频率分量两倍以上的速度进行采样以保留所有频率分量。换言之，要想真实地表示模拟信号，数字采样必须使得采样频率 f_s 满足如下公式：

$$f_s > 2f_{max} \tag{8-1}$$

其中，f_{max}是输入模拟信号的最高频率分量；f_s 为**采样率**，所需最小速率的限制($2f_{max}$)称为**奈奎斯特频率**。如果我们用截断傅里叶级数近似信号，则最大频率分量是最高谐波频率。数字样本之间的时间间隔为：

$$\Delta t = 1/f_s \tag{8-2}$$

如采样率为 5000Hz，则样本之间的时间间隔为 0.2ms。

如果信号的采样频率小于其最大频率分量的两倍，则可能会产生混叠现象。图 8-2 所示为模拟正弦波在显示点有规律地采样。12 个等距采样点覆盖了原始信号的 10 个周期。因此，采样频率为 $1.2f_0$，其中 f_0 是原正弦波的频率。由于采样频率不大于 $2f_0$，所以我们没有捕获原信号的频率。此外，采样信号的视在频率为 $0.2f_0$(相对于 10 个原始信号周期只显示出 2 个混叠的信号周期)。你可以认为这是一个“幻影”频率，一个真实频率的别名。因此，欠采样不仅导致错误而且会产生并不真实存在的信息。视频演示 8.1 展示了正弦波信号采样率、奈奎斯特频率和混叠的概念，视频演示 8.2 提供了一个混叠直观有趣的例子。

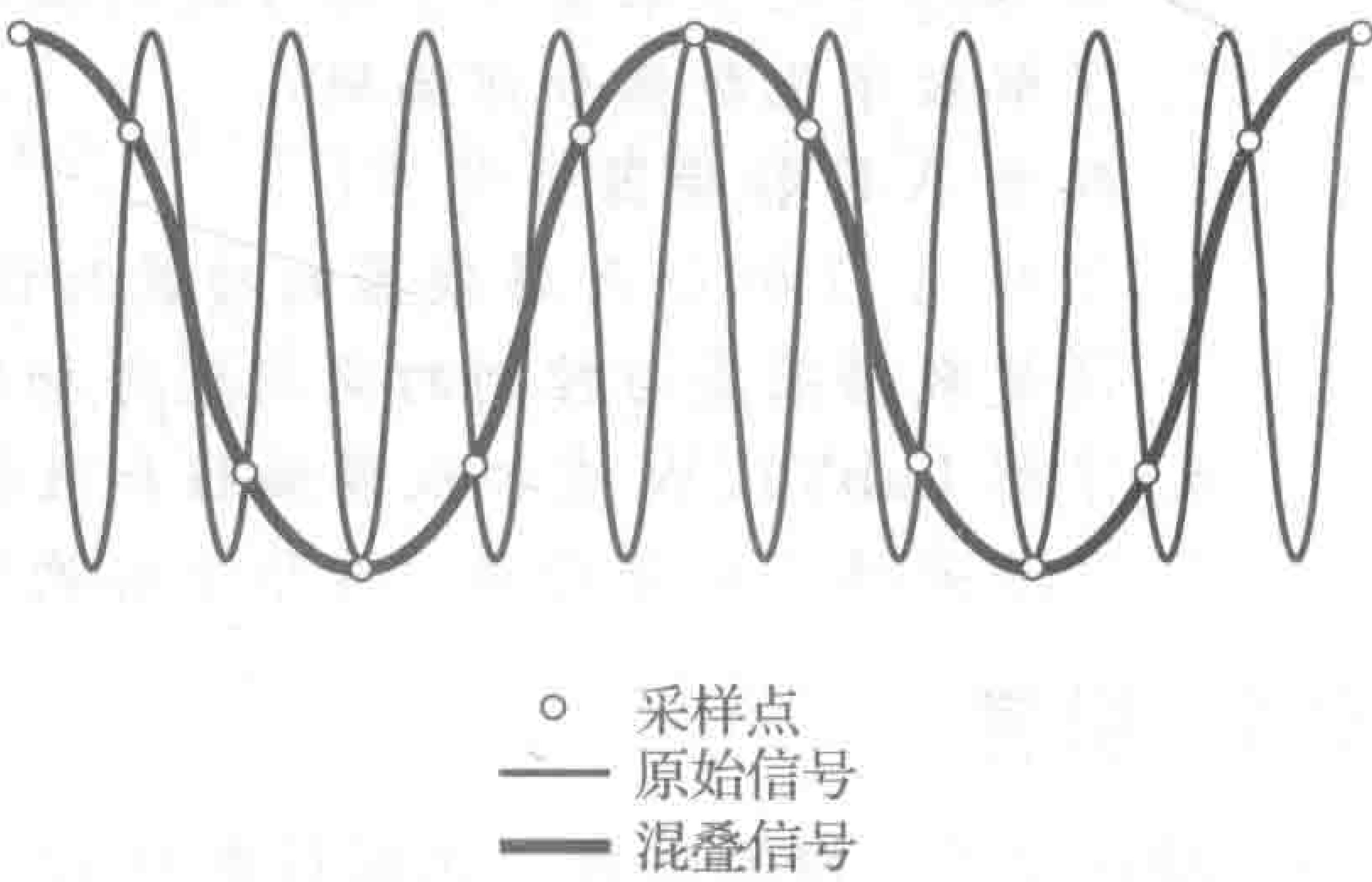


图 8-2 混叠现象

在第 4 章中提出的傅里叶分解提供了一种确定任意模拟信号的频率分量的方法。利用频率分量表示信号，使我们能够识别带宽和正确应用采样定理。

课堂讨论项目 8.1　货车车轮及采样定理

关于采样定理及其对正确和不正确数据表示的影响，可以用电影摄影机在拍摄一个旋转的车轮来表示。摄影机快门可以认为是一个采样装置，其中快门速度是采样率。在通常情况下，采样率为30Hz，它可以提供一个对人眼无闪烁的图像。当车轮快速转动时，在电影中你会看到什么样的视觉效果？

例 8.1　采样定理和频率混叠

函数：

$$F(t) = \sin(at) + \sin(bt)$$

对于两个正弦函数之和使用三角恒等式，我们可以重写 $F(t)$ 为以下形式：

$$F(t) = \left[2\cos\left(\frac{a-b}{2}t\right)\right]\sin\left(\frac{a+b}{2}t\right)$$

如果频率 a 和 b 数值相近，相比右边的正弦项，括号项具有一个非常低的频率。因此，括号项对高频正弦项具有调幅作用。当两个频率相近的波形叠加时，由此产生的波形表现出所谓的**拍频**，这在光学、机械学和声学上很常见。如果想了解更多关于拍频的信息和音频例子，请参见网络链接 8.1 和视频演示 8.3。

为了说明与不适当采样相关的混叠，使用两个不同的采样频率绘制波形。如果 a 和 b 取为：

$$a = 1\text{Hz} = 2\pi\text{rad/s} \quad b = 0.9a$$

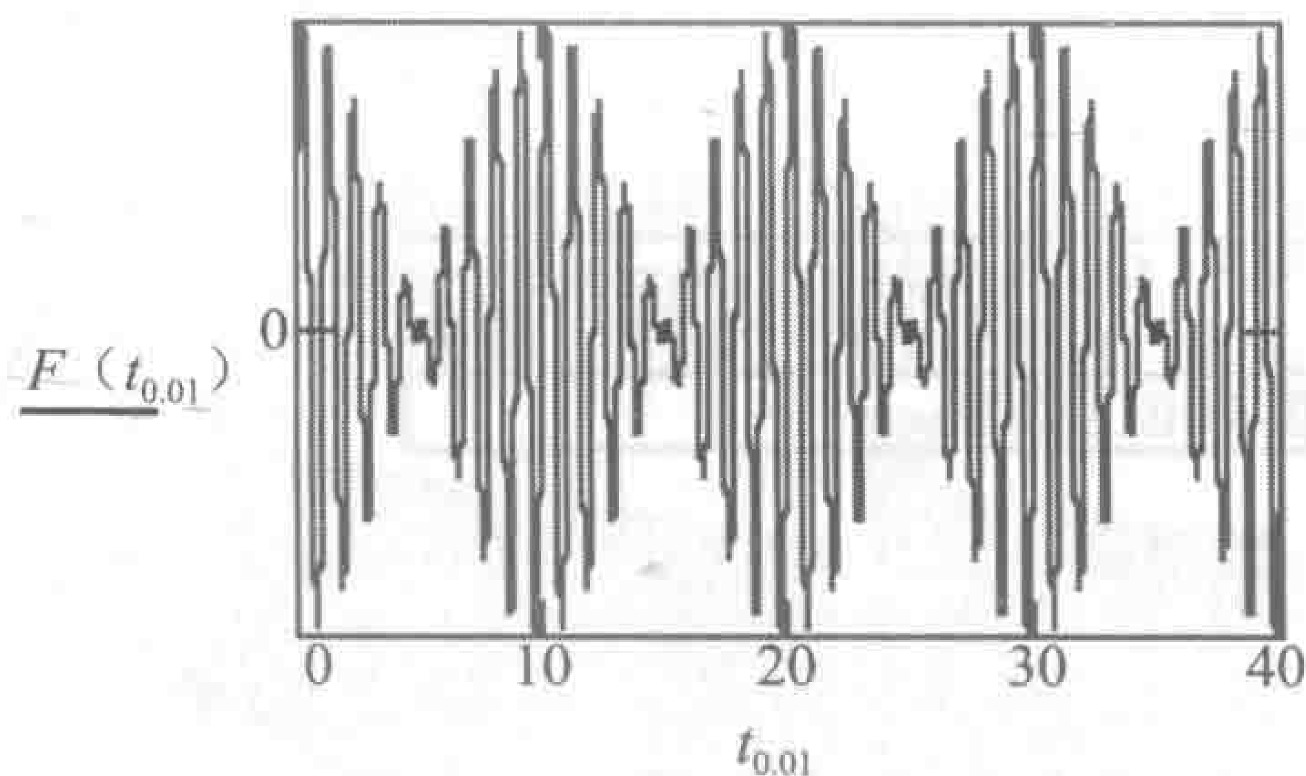
然后适当地采样信号 $F(t)$，采样率必须大于信号最高频率的两倍，即

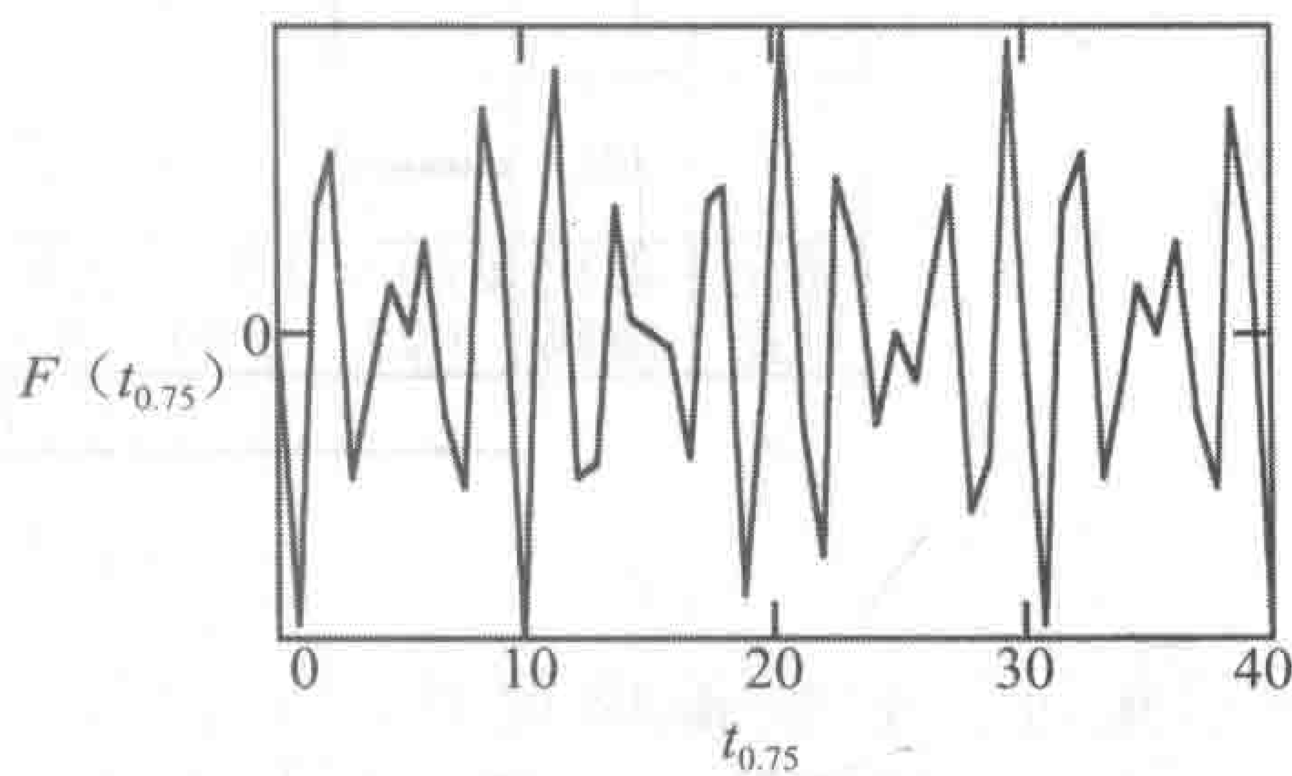
$$f_s > 2a = 2\text{Hz}$$

因此，采样时间间隔必须满足：

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} < 0.5\text{s}$$

第一个数据集以 0.01s(100Hz 采样率)的时间间隔进行绘制，给出波形的一个准确表示。第二个数据集以 0.75s(1.33Hz 采样率)的时间间隔进行绘制，采样率小于最大采样频率的两倍(2Hz)。由图可见信号是欠采样和混叠的，采样波形与真实波形不一致，观察到的最大频率大约为 0.4Hz，因为 10s 内大约有 4 个周期。





你可能会认为这两个图形都不完美，然而，与第二幅图不同，第一幅图保留了模拟信号中的所有频率信息。数学辅助设计软件 Mathcad 示例 8.1 中包含了用于生成上面图形的分析代码，您可以轻松地编辑该文件，以查看不同采样率的影响。

课堂讨论项目 8.2　采集一个拍频信号

为了充分表示例 8.1 中的信号，需要的最低采样率是多少？

当利用一个音乐播放器对一个正弦波信号和音频进行数字化时，实验练习 12 给出了使用不同采样率时的影响。视频演示 8.4 和 8.5 表明了这个结果，视频演示 8.6 只包含音频，视频演示 8.7 说明了采样率对各种音调和录音的影响。对于不同音乐、声音、振动概念的视频演示参见网络链接 8.2。

8.2 量化理论

现在来看看将采样模拟电压转换成数字形式所需的过程，这个过程称为模-数转换(A-D)，包括两个步骤：量化和编码。**量化**定义为一个连续的模拟输入到一组离散输出间的状态转换。**编码**是对每个输出状态分配相应的数码或数字。图 8-3 说明了如何将连续电压范围划分为离散输出状态，其中每一个状态分配唯一的代码。每个输出状态对应一定的电压范围。阶梯信号表示在相应的电压范围内模拟信号的线性斜坡对应的数字信号的状态。

模-数转换器是将模拟电压转换成数字代码的电子设备。A-D 转换器的输出可以直接连接到微控制器和计算机等数字设备。A-D 转换器的**分辨率**用来表示模拟输入值的位数。A-D 转换器所能表示的状态数量 N 等于其输出位组合的个数：

$$N = 2^n \tag{8-3}$$

其中，n 是位数。如图 8-3 所示，3 位装置有 2^3 或 8 种输出状态，列于第一列。输出状态通常从 0 到 $N-1$ 连续编号。在第二列中列出了每个输出状态对应的码字。大多数商业 A-D 转换器分别是 8、10 或 12 位的，分别对应 256、1024 和 4096 个输出状态。

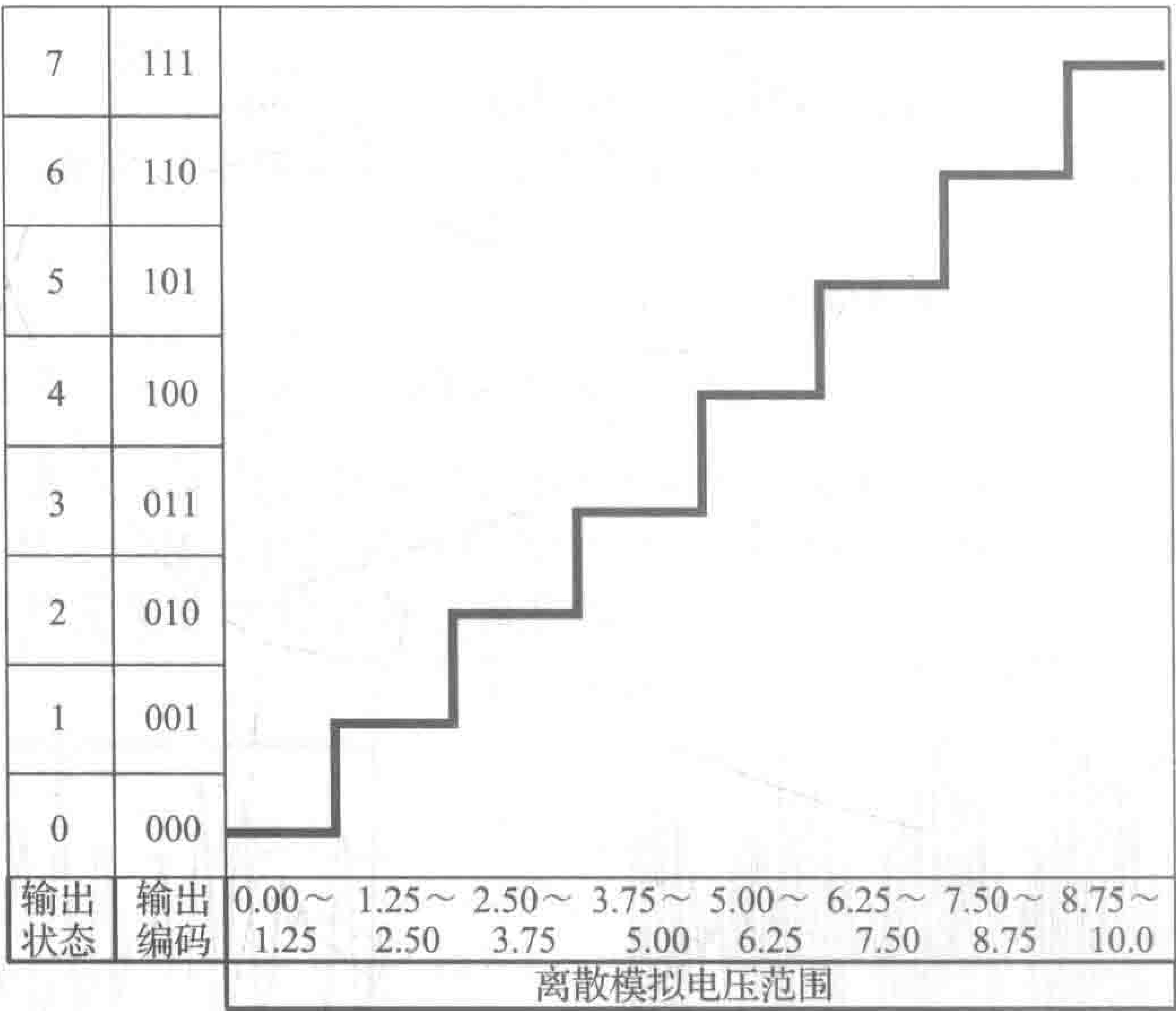


图 8-3 模-数转换

在量化过程中模拟**决策点**的数量是 $N-1$。由图 8-3 可知，决策点发生在 1.25V，2.50V，…，8.75V 等处。**模拟量化大小**为 Q，有时称为**编码宽度**，其定义为 A-D 转换器输出的满量程范围除以输出状态的数量：

$$Q = (V_{\max} - V_{\min})/N \tag{8-4}$$

这是一个可以被 A-D 转换器分辨出的模拟输入改变值。虽然分辨率定义为 A-D 转换器输出的位数，但有时也用来表示模拟量化值的大小。对于上面的例子，模拟量化值大小是 10V/8=1.25V。这意味着数字化信号的振幅误差最多为 1.25V。因此，该 A-D 转换器只能分辨 1.25V 内的电压信号。

视频演示 8.7 展示了采样率和 A-D 转换器的分辨率如何影响数字化音乐的保真度。

课堂讨论项目 8.3 实验室模-数转换器

为什么一个 12 位 A-D 转换器可以满足大多数实验室测量？

8.3 模-数转换

8.3.1 引言

为了正确获取进行数字处理的模拟电压信号，必须适当地选择下列组件并应用于该序列中。

1. 缓冲放大器
2. 低通滤波器
3. 采样和保持放大器
4. 模-数转换器
5. 计算机

模-数转换所需的组件以及它们各自输出的说明如图 8-4 所示。缓冲放大器将输出与输入隔离(它所需的电流和功率由输入提供，并可以忽略不计)，其输出是一个接近但不超过 A-D 转换器的全输入电压范围的信号。低通滤波器能使有用频率信号通过而同时抑制无用的频率信号，具有滤除高频干扰信号的功能。低通滤波器的截止频率应不大于采样率的 1/2。采样保持放大器(参见第 5.12 节)在 A-D 转换器短暂的转换时间内保持输出为固定的瞬时采样值。A-D 转换器应具有适合系统和信号需求的分辨率和模拟量化值。计算机必须正确连接到 A-D 转换系统以存储和处理数据。计算机还必须有足够的内存和永久存储介质以容纳所有数据。

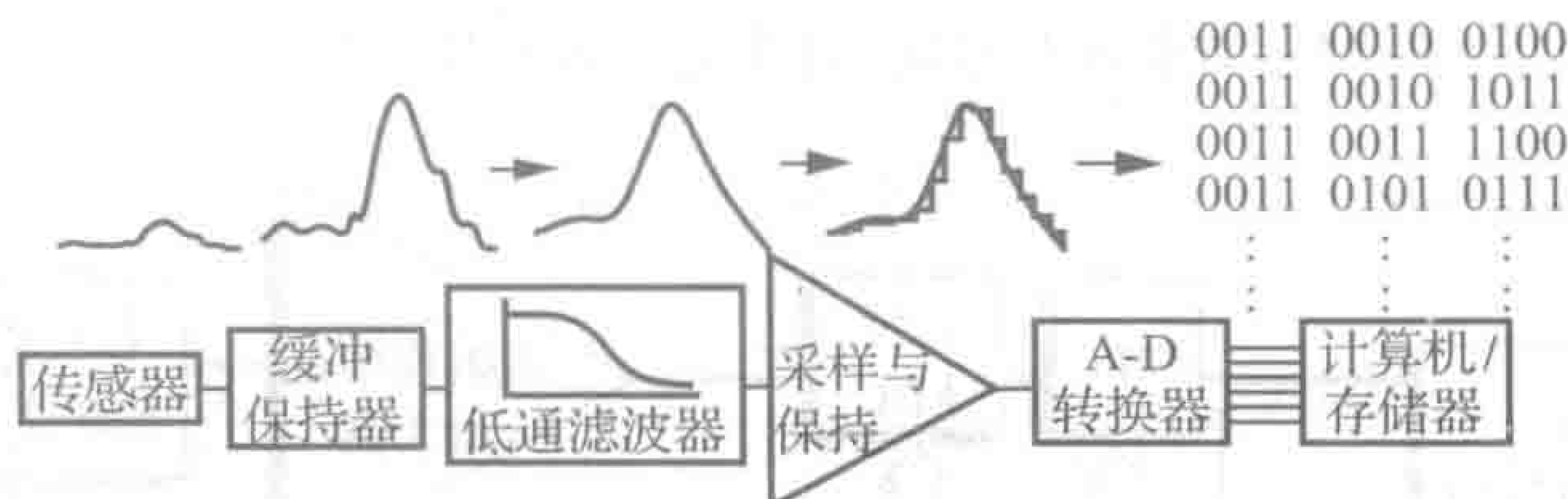


图 8-4 模-数转换中的各组件

上面描述的 A-D 系统组件能够在数据采集(DAC 或 DAQ)卡或模块的各种商业产品中找到。如图 8-5 所示，DAC 产品具有多种形式，包括 PC 和仪表板插件卡，笔记本电脑的 PCMCIA 卡，具有标准接口的独立外部单元(如 USB 接口)。网络链接 8.3 提供了市场上各种产品的供应商和信息来源的链接。



图 8-5 数据采集产品的各种形式(资料由美国国家仪器公司提供)

数据采集卡和模块通常支持可以方便访问该产品特性的各种高级语言接口(如 C++、Visual Basic、FORTRAN)。易用的应用软件还提供了图形化接口以编程 DAC 模块来采集、处理和输出信号。以 NI 的 LabVIEW 软件为例(更多信息详见网络链接 8.4 和 8.5

节)，对于商用 DAC 产品，机电一体化系统或试验设备和台式计算机之间的接口仅是一个简单调用函数，该函数可为客户编写的程序或在图形界面中单击并拖动图标获得。实验练习 12 探索了如何利用 LabVIEW 软件采样和存储外部电压信号或采样的音乐信号。视频演示 8.5 展示了过程中的所有步骤，8.6 节对此进行了详细介绍。

除了 A-D 转换器，商用 DAC 系统通常还提供其他输入/输出功能，包括二进制输入和输出(与 TTL 兼容的)、D-A 转换器、计数器、定时器和信号调理电路。选择 DAC 系统时，重要指标包括 A-D 和 D-A 分辨率(位数)和最高采样率。这些指标对保证计算机监控应用的精度和可靠性非常关键。图 8-6 所示为一款可以插入到 PC 主板插槽的数据采集控制卡，其内部结构如图 8-7 所示。该卡包括两个 12 位的 D-A 转换器，一个 12 位的 A-D 转换器，24 位数字 I/O 和三个 16 位计数/定时器。

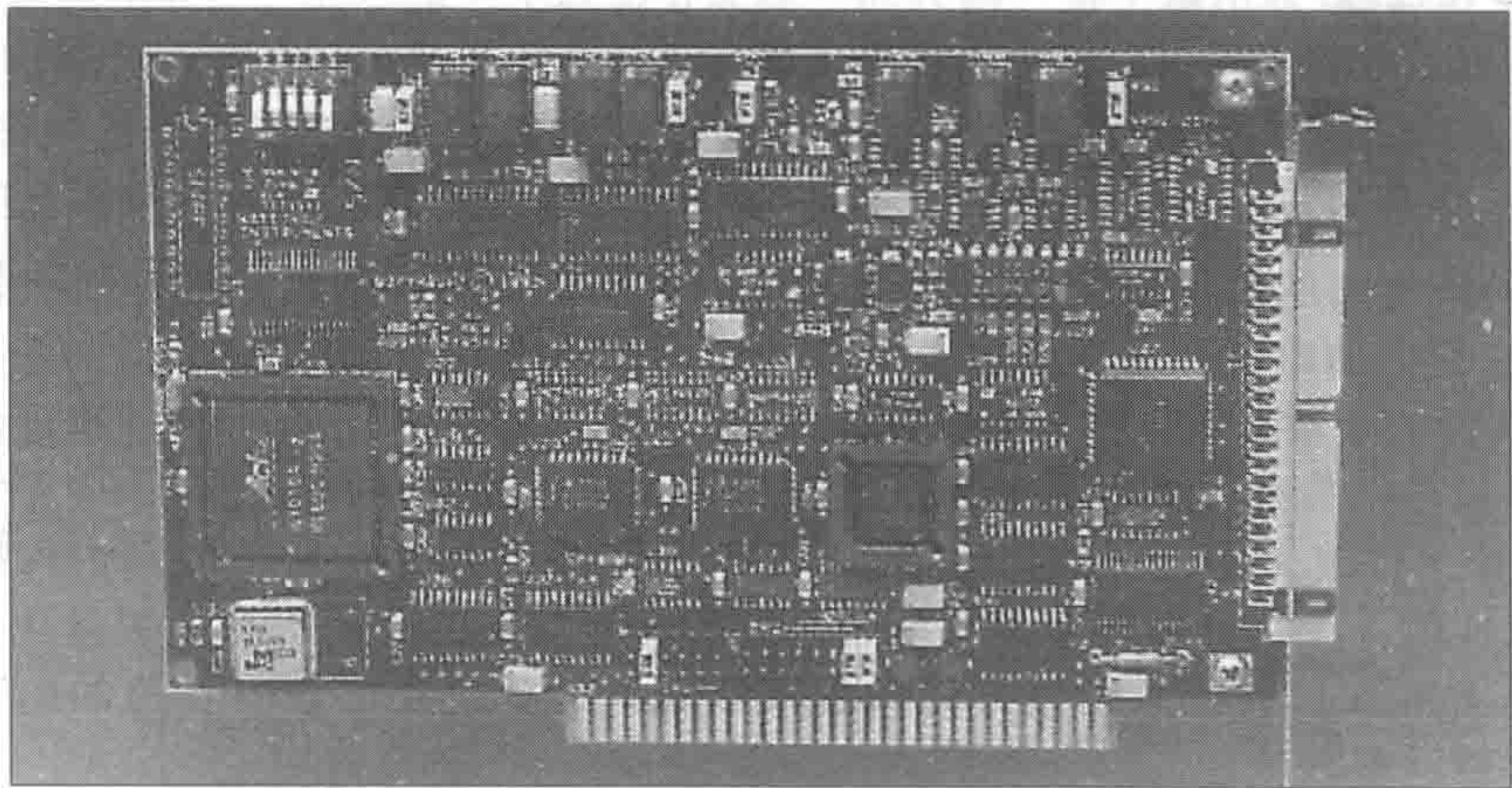


图 8-6　数据采集控制卡(由美国国家仪器公司生产)

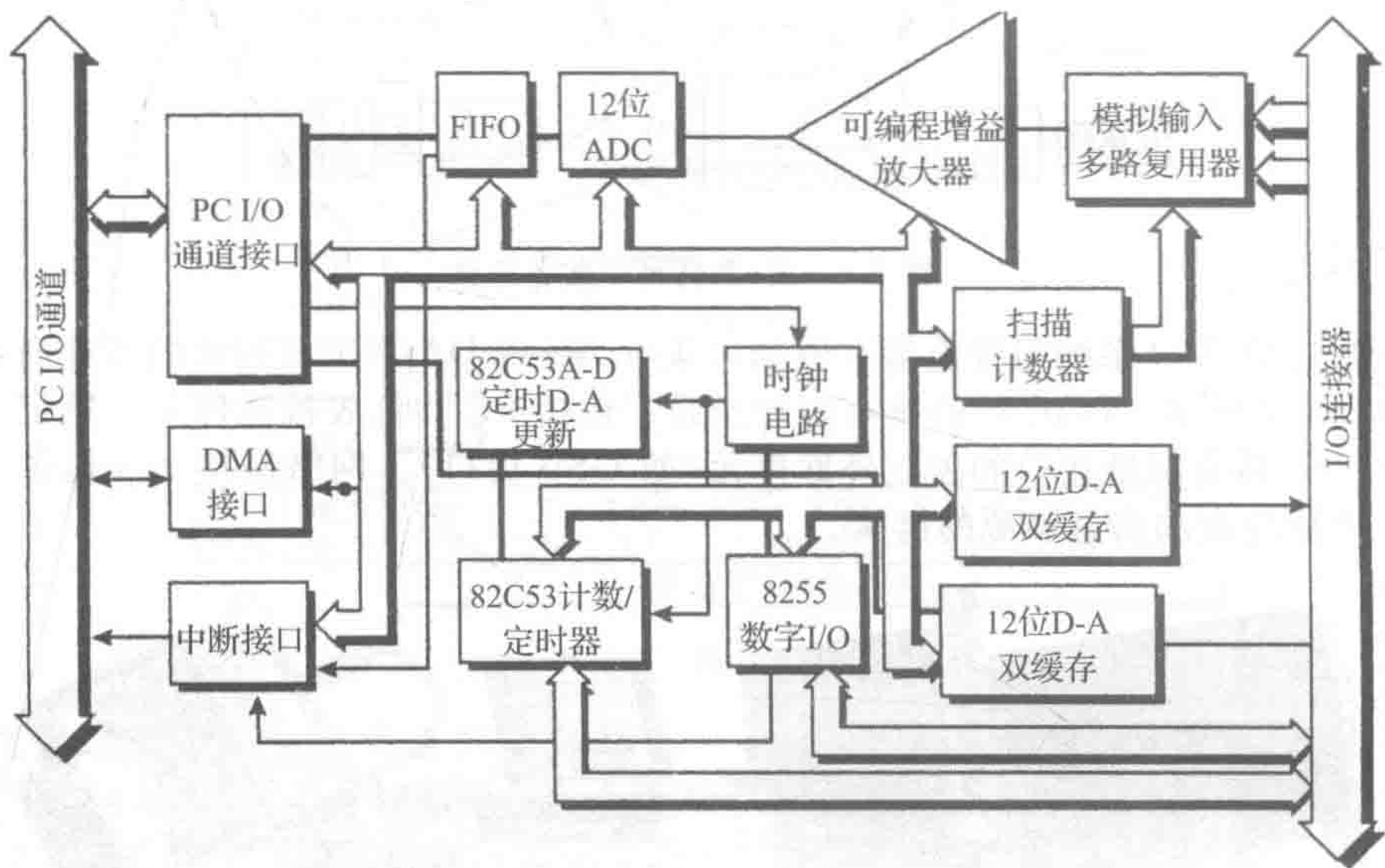


图 8-7　数据采集控制卡的体系结构(由美国国家仪器公司提供)

在评估转换结果的准确性时，需要考虑模-数转换过程所需的一个小但有限的时间间隔，即**转换时间**，或称为**建立时间**，它取决于转换器的设计、用于转换的方法和在电子设计中使用的元器件的速度。由于模拟信号不断变化，所以在采样时间窗口内信号的不确定性将会导致相应转换数值的不确定性。当 A-D 输入没有增加采样保持放大器时尤其需要

特别注意。**孔径时间**指的是转换时间窗口的持续时间，它与在此时间内由于输入信号的改变所导致的数字输出误差相关。孔径时间和输入幅值的不确定性关系如图 8-8 所示。在孔径时间 ΔT_a 内，输入信号变化为 ΔV，其中：

$$\Delta V \approx \frac{dV(t)}{d_t}\Delta T_a \tag{8-5}$$

以大于或等于奈奎斯特频率采样将保持信号中正确的频率分量。然而，为了获得准确的幅值分辨率，A-D 转换器必须有足够小的孔径时间，对 10 或 12 位 A-D 转换器，孔径时间通常在纳秒量级。

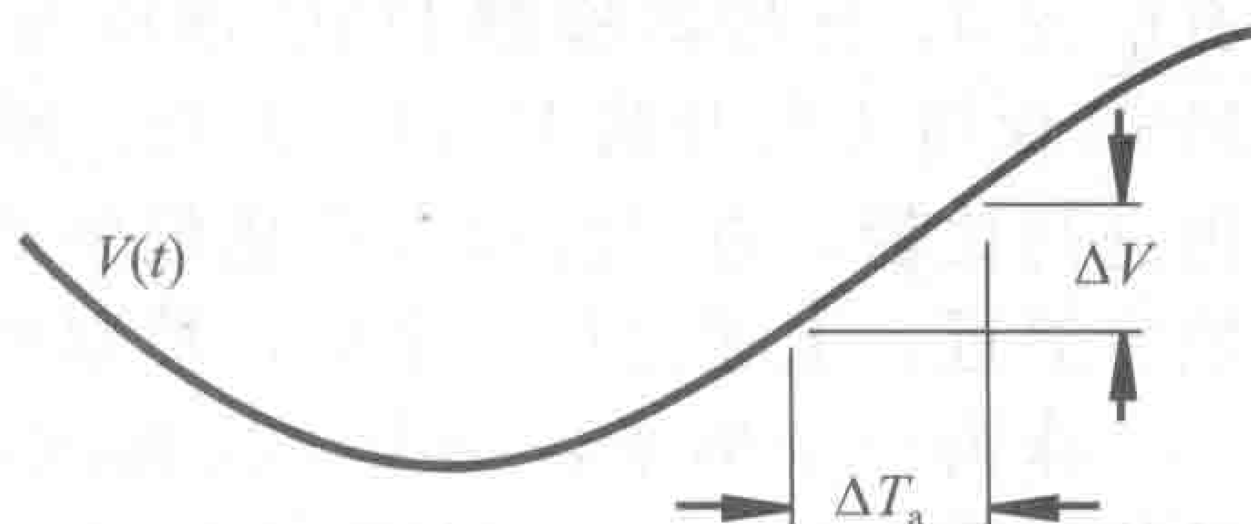


图 8-8 A-D 转换器的孔径时间

说明：$V(t)$为输入信号，ΔV 为输入信号变化，ΔT_a 为穿孔时间。

例 8.2　孔径时间

令一个正弦信号 $A\sin(\omega t)$作为 A-D 转换器的输入。信号的时间变化率 $A\omega\cos(\omega t)$具有的最大值为 $A\omega$，使用式(8-5)，在孔径时间 ΔT_a 内，输入电压的最大变化为：

$$\Delta V = A\omega\Delta T_a$$

为了消除数字输出值的不确定性，需确保 ΔV 小于模拟量化值的大小：

$$\Delta V < \frac{2A}{N}$$

其中，$2A$ 是总电压范围；N 是输出状态的数量。上式的上限值为：

$$\Delta V = \frac{2A}{N}$$

因此，如果不使用采样保持放大器，则所需的孔径时间：

$$\Delta T_a = \frac{\Delta V}{A\omega} = \frac{2}{N\omega}$$

假设使用 10 位分辨率的转换信号，它提供了 2^{10}(1024)个输出状态。如果信号是 10kHz 带宽的语音(来自传声器)，ΔT_a 必须小于：

$$\Delta T_a = \frac{2}{N\omega} = \frac{2}{1024(2\pi \times 10\,000)} = 3.2\times 10^{-8} = 32\text{ns}$$

相比所需的最小采样周期 $1/(2\times 10\text{kHz}) = 50\mu\text{s}$，所需的孔径时间非常短。甚至对如此低分辨率的转换器，所需的孔径时间(32ns)比所需的采样周期小得多(50 000ns)。

8.3.2 模-数转换器

A-D 转换器的设计原理包括：逐次逼近、闪存或并行编码、单斜率和双斜率积分、开关电容。本节仅介绍商业设计中最为常用的前两种转换原理。**逐次逼近式** A-D 转换器因其相对快速、便宜而被广泛应用。如图 8-9 所示，在反馈回路中使用了 D-A 转换器，D-A 转换器在下一节中描述。当启动信号有效时，采样保持放大器锁存模拟输入，然后控制单元开始数值逼近的迭代过程，转换的数字量由 D-A 转换器转换成用于逼近比较的模拟量，并与比较器中的模拟输入进行比较。当 D-A 输出等于模拟输入时，转换完成，控制单元设置转换结束信号，并在输出端提供正确的数字输出。

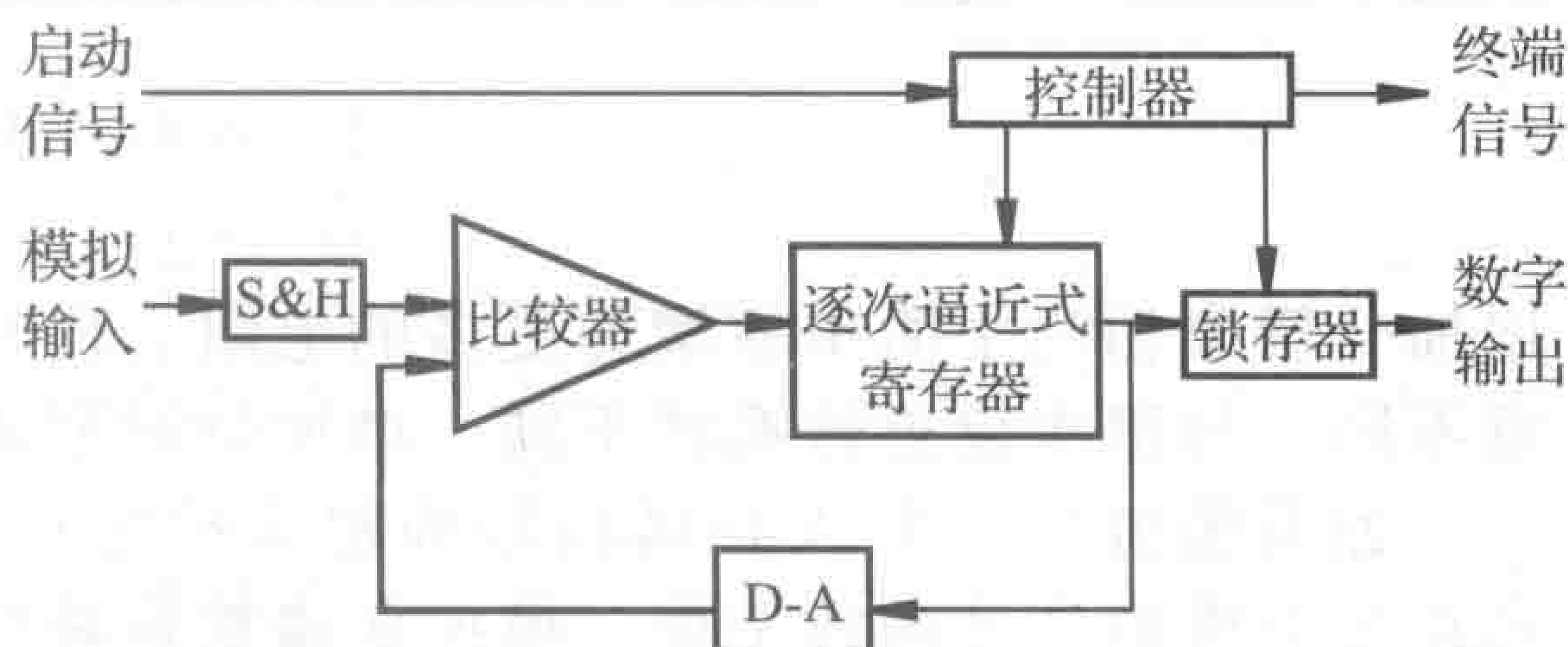


图 8-9 逐次逼近式 A-D 转换器

如果 n 是 A-D 转换器的分辨率，那么它需要 n 步完成转换过程。具体而言，输入与相当于 A-D 转换器满量程(FS)值的二分幅值组合(1/2，1/4，1/8，…

$1/2^n$)逐步对比。控制单元首先打开(置1)逐次逼近式寄存器的最高有效位(MSB)，其余所有位置0，比较器检测DAC输出与模拟输入的大小。如果模拟输入超过DAC输出，则MSB保持为打开状态(1)，否则，MSB置0。然后将此过程应用到下一个较小的有效位，再进行比较，直至经过n次比较到达最低有效位(LSB)。DAC的输出则是模拟输入的最佳数字逼近。上述过程结束后，控制单元设置终止信号，表示转换结束。

作为一个例子，一个4位逐次逼近的过程如图8-10所示。MSB是1/2FS，大于信号，因此，该位置0。第二位是1/4FS，小于信号，所以该位置1。第三位是(1/4+1/8)FS，仍小于模拟信号，所以该位也置1。第四位是(1/4+1/8+1/16)FS，大于信号，因此该位置0，转换结束。数字化结果为0110，更高的分辨率将产生更精确的值。

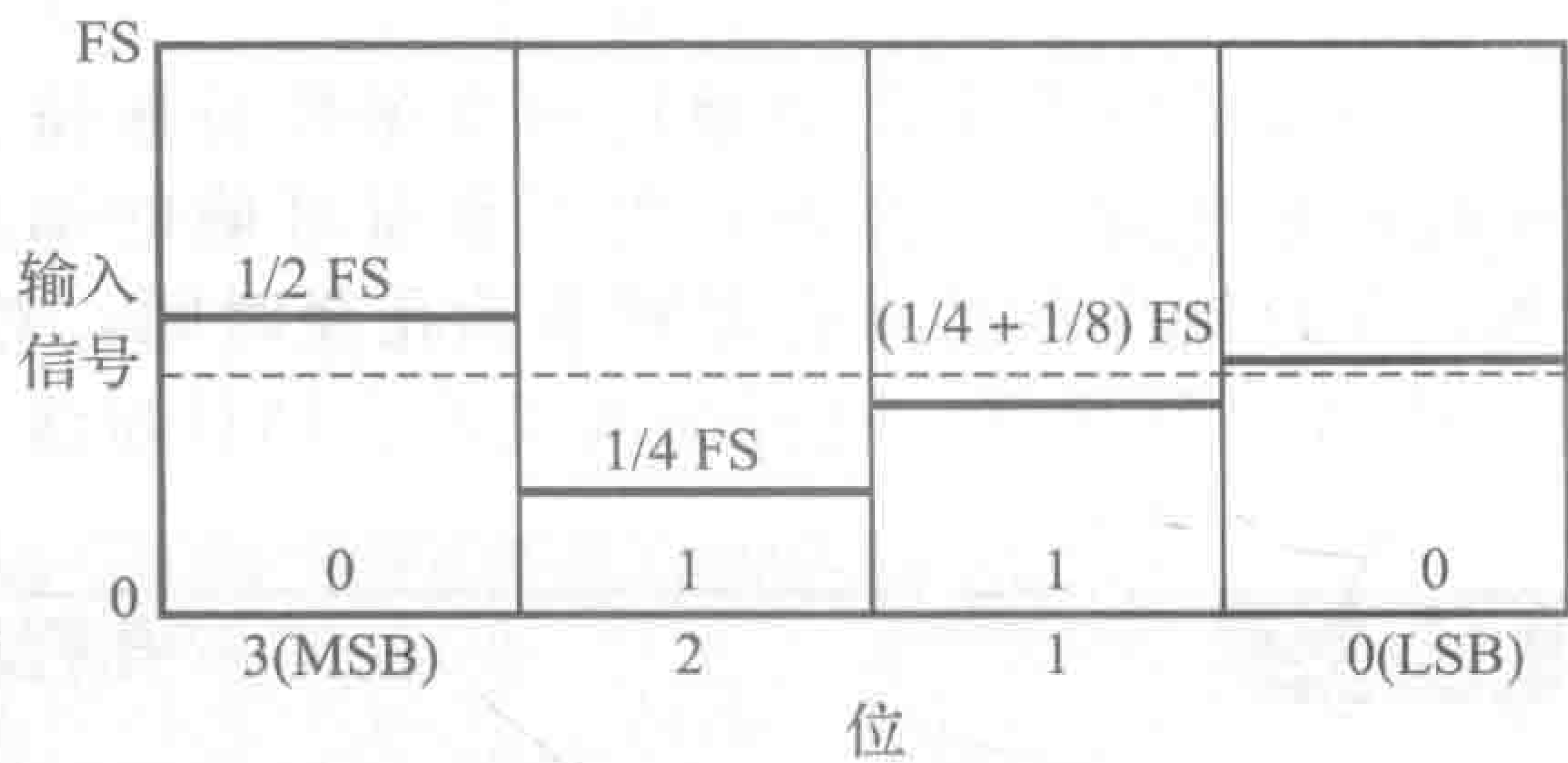


图8-10　4位逐次逼近式A-D转换

一个n位逐次逼近A-D转换器的转换时间为$n\Delta T$，其中ΔT是D-A转换器和控制单元的循环时间。8、10和12位逐次逼近A-D转换器的典型转换时间范围为1～100μs。

最快的A-D转换器类型称为**闪存转换器**，如图8-11所示，它由一堆并行的输入比较器组成用于识别信号电平。锁存器的输出即为转换出的组合逻辑的二进制编码。如图8-11所示，闪存转换器是一个分辨率为四位输出状态的转换器。假设输入电压范围为0～4V，表8-1列出了比较器的输出代码和相应状态的二进制输出。电源电压范围是V_{min}～V_{max}，如图8-11所示(本例中为0～4V)。代码转换器是一个简单的组合逻辑电路。对于2位转换器，编码位G_i和二进制位B_i之间的关系(见习题8.11)如下：

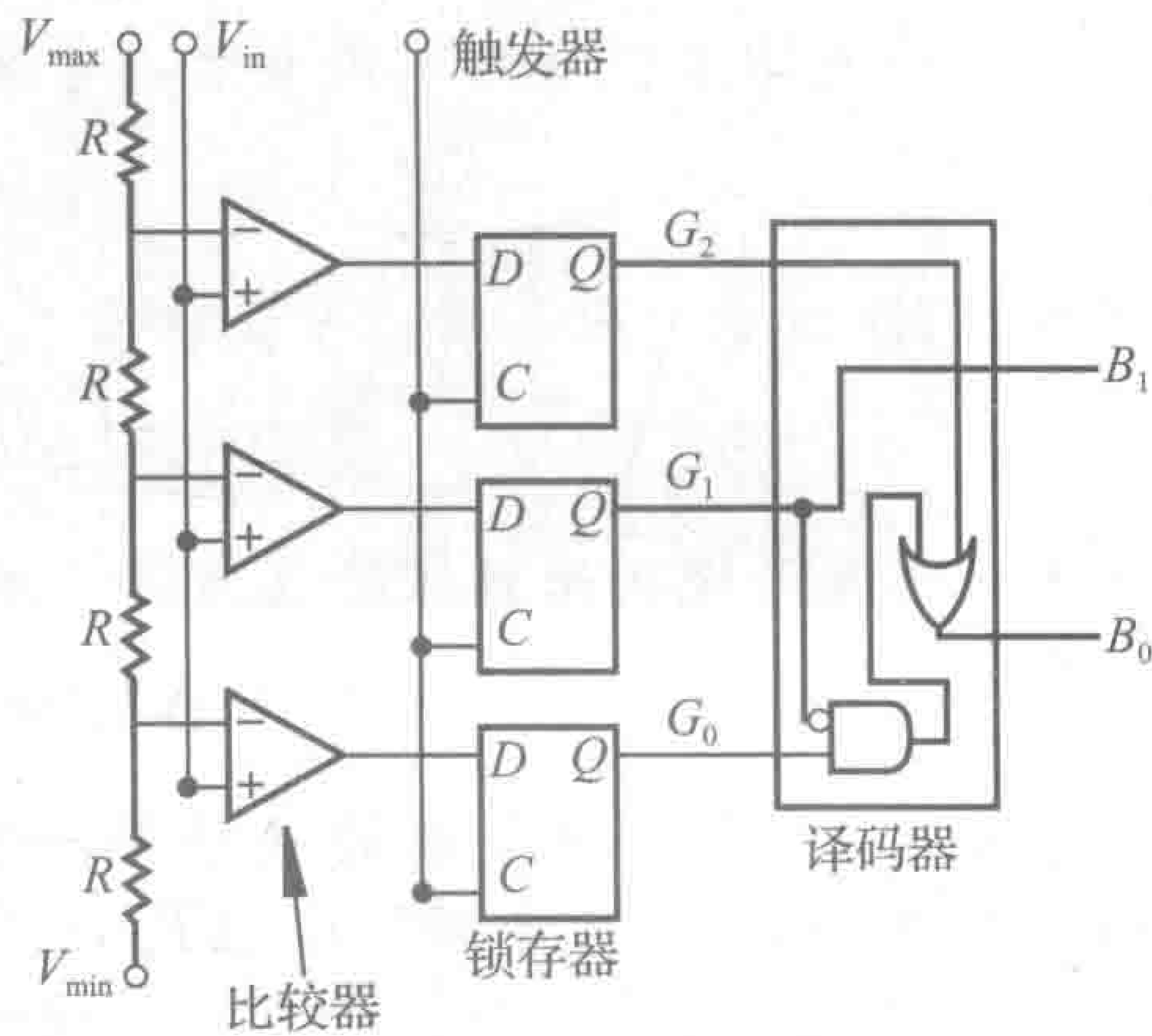


图8-11　A-D闪存转换器

表8-1　2位闪存转换器输出

状态	编码($G_2G_1G_0$)	二进制(B_1B_0)	电压范围
0	000	00	0～1
1	001	01	1～2
2	011	10	2～3
3	111	11	3～4

$$B_0 = G_0 \cdot \overline{G_1} + G_2 \quad (8\text{-}6)$$

$$B_1 = G_1 \quad (8\text{-}7)$$

增加分辨率相当于简单地增加更多的电阻、比较器和锁存器。组合逻辑代码转换器也将有所不同。与逐次逼近转换器不同，增加分辨率不会增加转换所需的时间。

如果模拟信号在A-D转换器的输入端进行了多路复用，则可以由一个A-D转换器来实现多个模拟信号的数字化。模拟**多路复用器**使用晶体管、继电器和控制信号在多个模拟输入之间进行切换，这可以大大降低系统设计的成本。除了成本，在选择A-D转换器时

其他的重要参数包括：输入电压范围、输出分辨率和转换时间。

课堂讨论项目 8.4　选择一个 A-D 转换器

为什么设计者可能会选择一个10位的A-D转换器，而不是一个12位或更高分辨率的转换器？

8.4 数-模转换

将数字值转换为模拟电压(A-D转换的反向过程)称为**数-模(D-A)转换**。D-A转换器允许计算机或其他数字设备与外部模拟电路和设备相连接。

最简单的D-A转换器是一个电阻梯形网络连接一个反相运算放大器电路，如图8-12所示。这个转换器是一个4位 $R-2R$ 电阻梯形网络，这个网络只需要两个精密电阻值(R 和 $2R$)。数字DAC的输入是一个4位二进制数，由 b_0、b_1、b_2 和 b_3 表示，其中 b_0 是最低有效位和 b_3 是最高位，电路中每一位控制地与运算放大器反相输入之间的开关。为了理解输入的二进制数与模拟输出电压 V_{out} 之间的关系，我们可以分析四种不同的输入组合0000、0010、0100、1000，并应用叠加原理推广应用到任意的4位二进制数中。

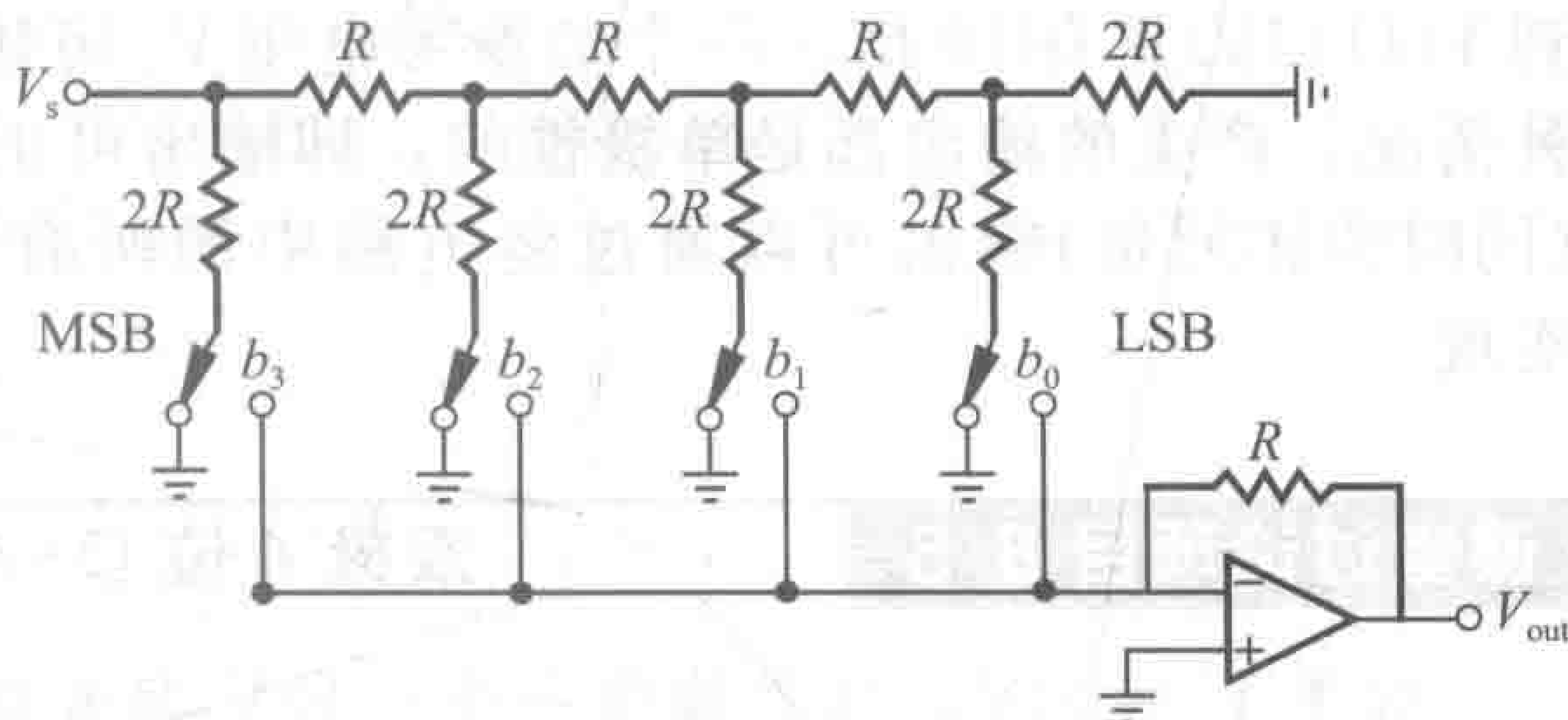


图8-12　4位电阻梯形D-A转换器

如果二进制数是0001，b_0 开关连接到运算放大器，其他位开关接地，由此产生的电路如图8-13所示。由于运算放大器的同相输入端接地，反相输入端也接地，所以节点 V_0 和地面之间的等效电阻 R 是两个 $2R$ 电阻的并联组合。因此，V_0 是 V_1 两个等值电阻 R 串联分压的结果：

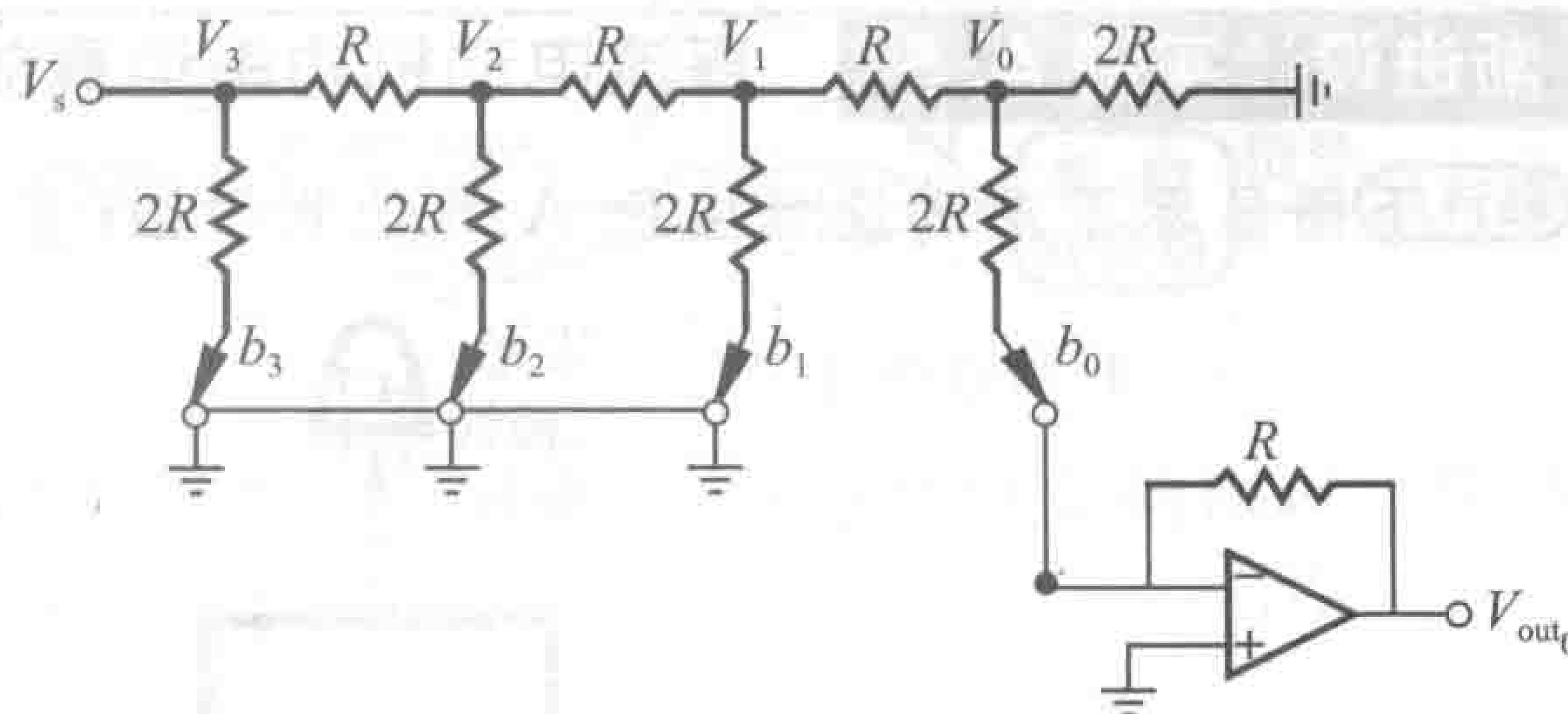


图8-13　具有数字输入0001的4位梯形电阻D-A转换器

$$V_0 = \frac{1}{2}V_1 \tag{8-8}$$

同样，可以得出：

$$V_1 = \frac{1}{2}V_2 \quad V_2 = \frac{1}{2}V_3 \tag{8-9}$$

因此：

$$V_0 = \frac{1}{8}V_3 = \frac{1}{8}V_s \tag{8-10}$$

V_0 是到反相放大器电路的输入，它有一个增益：

$$-\frac{R}{2R} = -\frac{1}{2} \tag{8-11}$$

因此，对应二进制输入0001的模拟输出电压是：

$$V_{out_0} = -\frac{1}{16}V_s \tag{8-12}$$

同样，对于输入0010，我们可以得到(见问题8.16～问题8.18)：

$$V_{\text{out}_1}=-\frac{1}{8}V_s \tag{8-13}$$

对于输入 0100，

$$V_{\text{out}_2}=-\frac{1}{4}V_s \tag{8-14}$$

对于输入 1000，

$$V_{\text{out}_3}=-\frac{1}{2}V_s \tag{8-15}$$

对任意二进制输入作用下的输出，可以使用叠加原理获得：

$$V_{\text{out}}=b_3V_{\text{out}_3}+b_2V_{\text{out}_2}+b_1V_{\text{out}_1}+b_0V_{\text{out}_0} \tag{8-16}$$

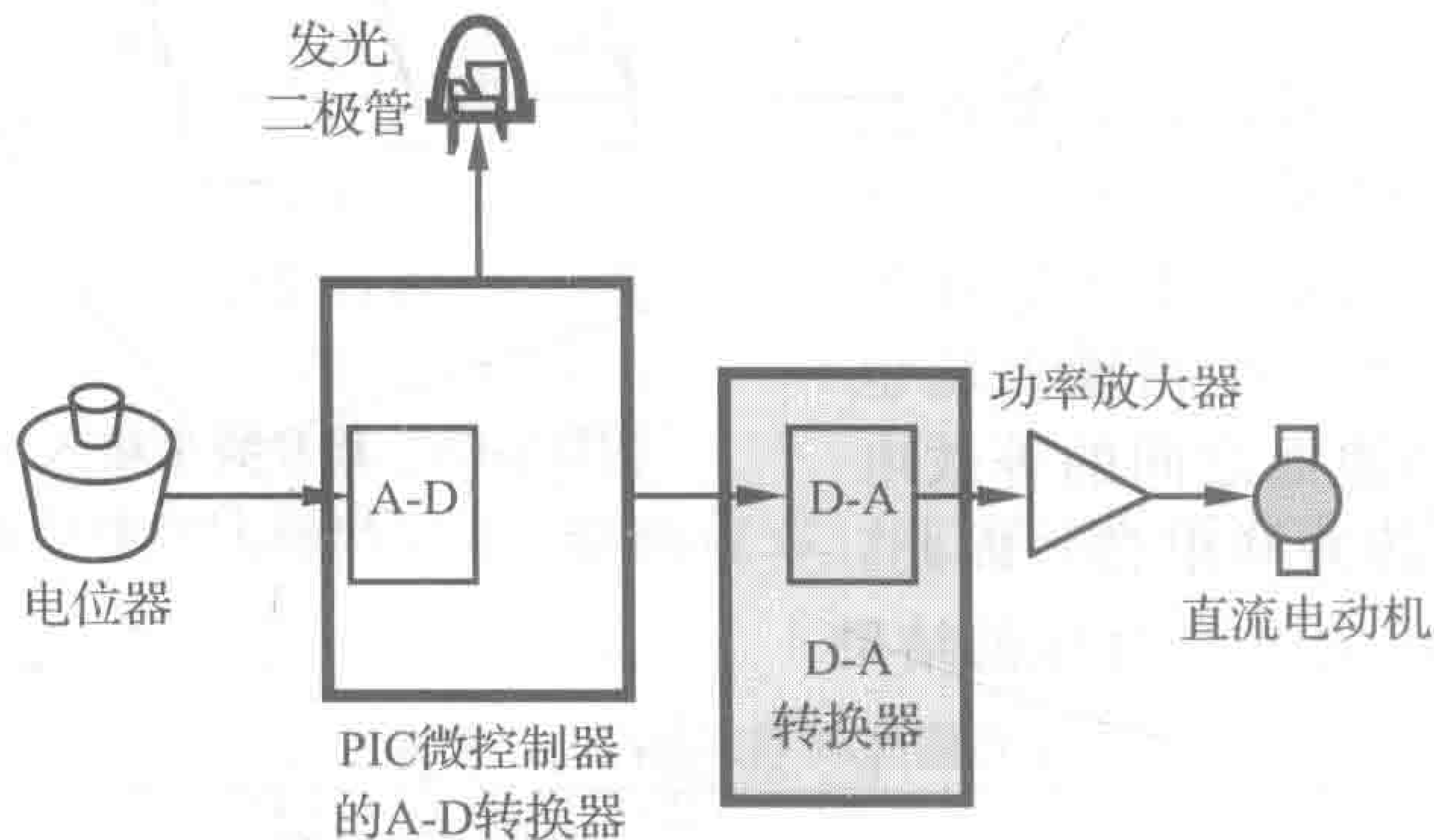
如果 V_s 是 10V，对于 4 位二进制输入，输出范围为 0～(−15/16)×10V，从 0000(0) 到 1111(15)具有 16 值。一个负参考电压 V_s 可用于产生一个正的输出电压范围。无论是哪种情况，产生的输出都是**单极性**的，即输出可正可负，但不可能同时为正或负。对**双极性**(同时为正或负)输出可以通过将电路中的所有参考地接至与 V_s 符号相反的参考电压来实现。

课堂讨论项目 8.5　双极 4 位 D-A 转换器

如果 V_s=10V，参考地由一个−10V 参考电压代替，对于 4 位 D/A R-2R 梯形网络，其二进制输入对应的输出电压是多少？

渐进设计实例 A.5　直流电动机功率运算放大器速度控制器——D-A 转换器接口

下图显示了渐进设计实例 A 的功能框图(见 1.3 节和视频演示 1.6)，详细描述如下。



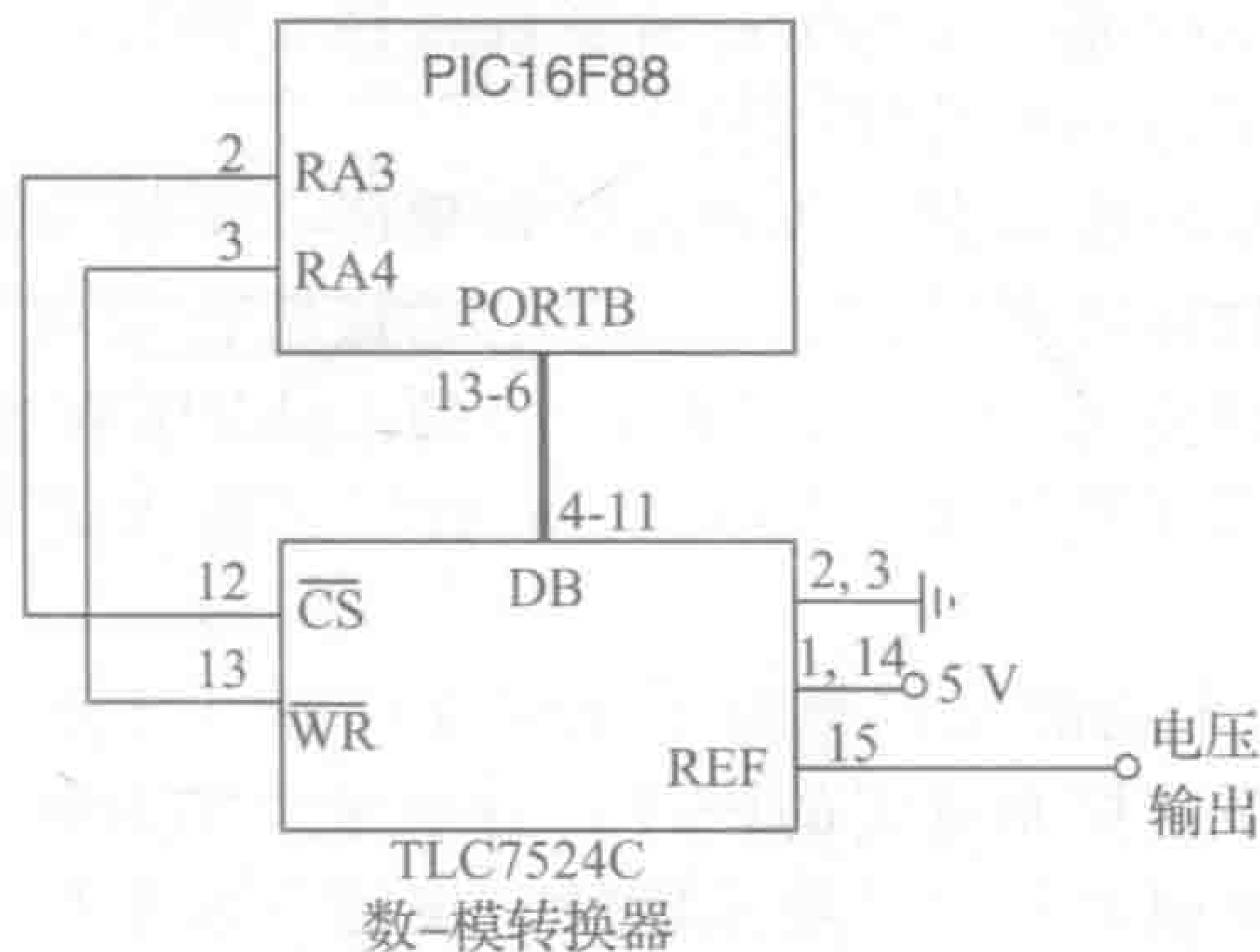
本设计中使用的 D-A 转换器是一个外部的 8 位 TLC7524 转换器，有关芯片的详细信息可以在网络链接 7.15 指向的数据手册中找到。如下图所示，PIC 微控制器通过两个控制线和 8 个数据线与 D-A 转换器(整个 PORTB 寄存器)接口。一个控制线是片选引脚，用来激活 D-A 转换器。另一个是写信号线用于通知 D-A 芯片执行转换，更新输出电压。两个信号线均为低电平有效。

初始化 PIC 输出并激活 D-A 转换器所需的代码如下：

```
da_cs Var PORTA.3        ' 外部D-A转换器片选信号(低：激活)

da_wr Var PORTA.4        ' 外部D-A转换器写信号(低：写)

TRISB = 0                ' 初始化PORTB引脚作为输出
High da_wr               ' 初始化A-D转换器写信号线
Low da_cs                ' 激活外部D-A转换器
```



更新 D-A 转换器的电压输出所需代码如下。该电压按比例转换为 PIC 中的一个字节变量值(ad_ byte)。取值范围为 0(对应于 0V)~255(对应于 5V)。整个字节(8 位)通过 PORTB 并行输入 D-A 转换器中。注意写命令后应有一个小的暂停，以确保写信号禁用之前完成转换。

```
' 将电位器对应的字节数发送给外部D-A转换器
PORTB = ad_byte
Low da_wr
Pauseus 1      ' 等待1ms
High da_wr
```

图 8-14 说明了 A-D 转换器和 D-A 转换器在机电控制系统中的作用。来自传感器的模拟电压信号(如热电偶)转换为数字值，计算机在控制算法中使用此值，向执行器(如电动机)输出模拟信号，使系统中的某些变化得到控制。该内容将在下一节和第 11 章进行更多的探讨。传感器和执行器是下两章的主题。

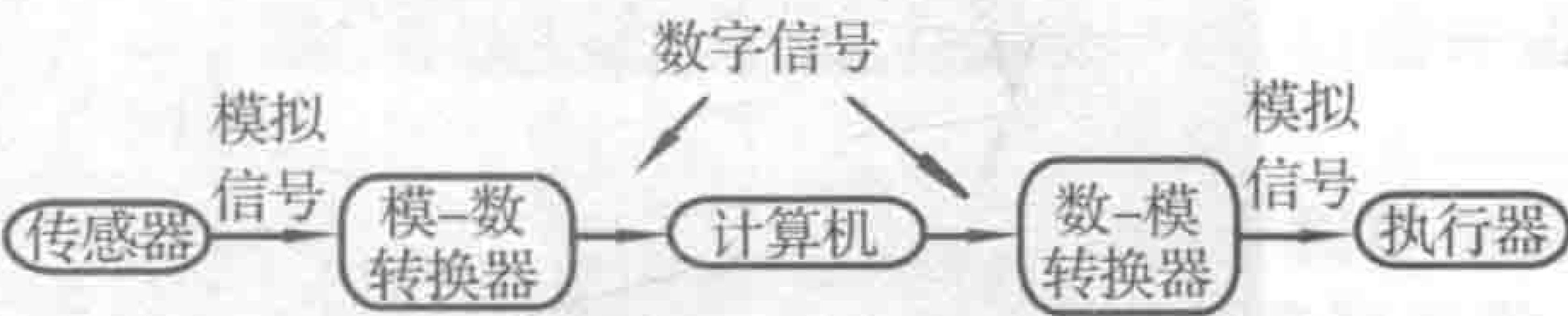


图 8-14　计算机控制硬件

课堂讨论项目 8.6　**音频 CD 技术**

光盘(CD)以数字格式存储音乐(模拟信号)，这是如何实现的？数字数据怎样转化为你所听到的音乐？假定可听频率范围为 20Hz~20kHz，采样率多少合适？对于这个采样率，在 CD 上必须存储多少位才能产生 45min 的听觉体验(例如，存储为 WAV 文件，而不是 MP3 文件)？假设只保存原始数据，且未使用网络链接 8.5 所述的复杂的误差校正和补偿方案。

课堂讨论项目 8.7　**数码吉他**

一个数码吉他是一个标准的电吉他，它配备发送 MIDI 信号到数字频率合成器的额外元器件。MIDI 是乐器的数字接口，一个 MIDI 信号由包含振幅和频率的音符码的数字字节组成，为了实现这个功能需要什么系统组件？

8.5　虚拟仪器、数据采集和控制

虚拟仪器(VI)由具有数据采集硬件的个人计算机和执行传统仪器功能的软件组成。如示波器和波形发生器是非常强大的独立的传统仪器，但高昂的费用限制了其应用。用户通

常不能扩展或自定义仪器的功能。仪器上的旋钮和按钮、内置电路、提供给用户的功能都是特定的。虚拟仪器提供了另一种替代选项。

软件是虚拟仪器的重要组成部分。通过设计和集成一个特定过程需要的例程，它可以用来创建定制化的应用。软件还允许创建一个合适的最适合应用的用户界面，且用户将与它交互。来自美国国家仪器公司(见网络链接 8.4)的 LabVIEW 软件是一个简单易用的专门用于创建虚拟仪器的应用开发环境。LabVIEW 提供了强大的功能，使连接到各种硬件和软件变得更容易。

LabVIEW 最强大的一个功能是它的图形化编程环境。自定义图形用户界面可以设计为允许用户操作的仪器程序，控制选定的硬件，分析采集的数据，并在 PC 屏幕上显示图形化结果。我们可以在虚拟前面板中自定义旋钮、按键、表盘和图表，用来模拟传统仪器的控制面板，并通过创建自定义测试面板，让控制和操作的过程可视化。图 8-15 显示了一个易于创建的图形用户界面。图 8-16 显示了用于创建用户界面并执行采集、分析和显示功能的框图。LabVIEW 是一个可视化的编程环境，可创建自定义应用和用户界面，您只需在屏幕上拖动、拖放和连接图标即可，不需要计算机编程技能。

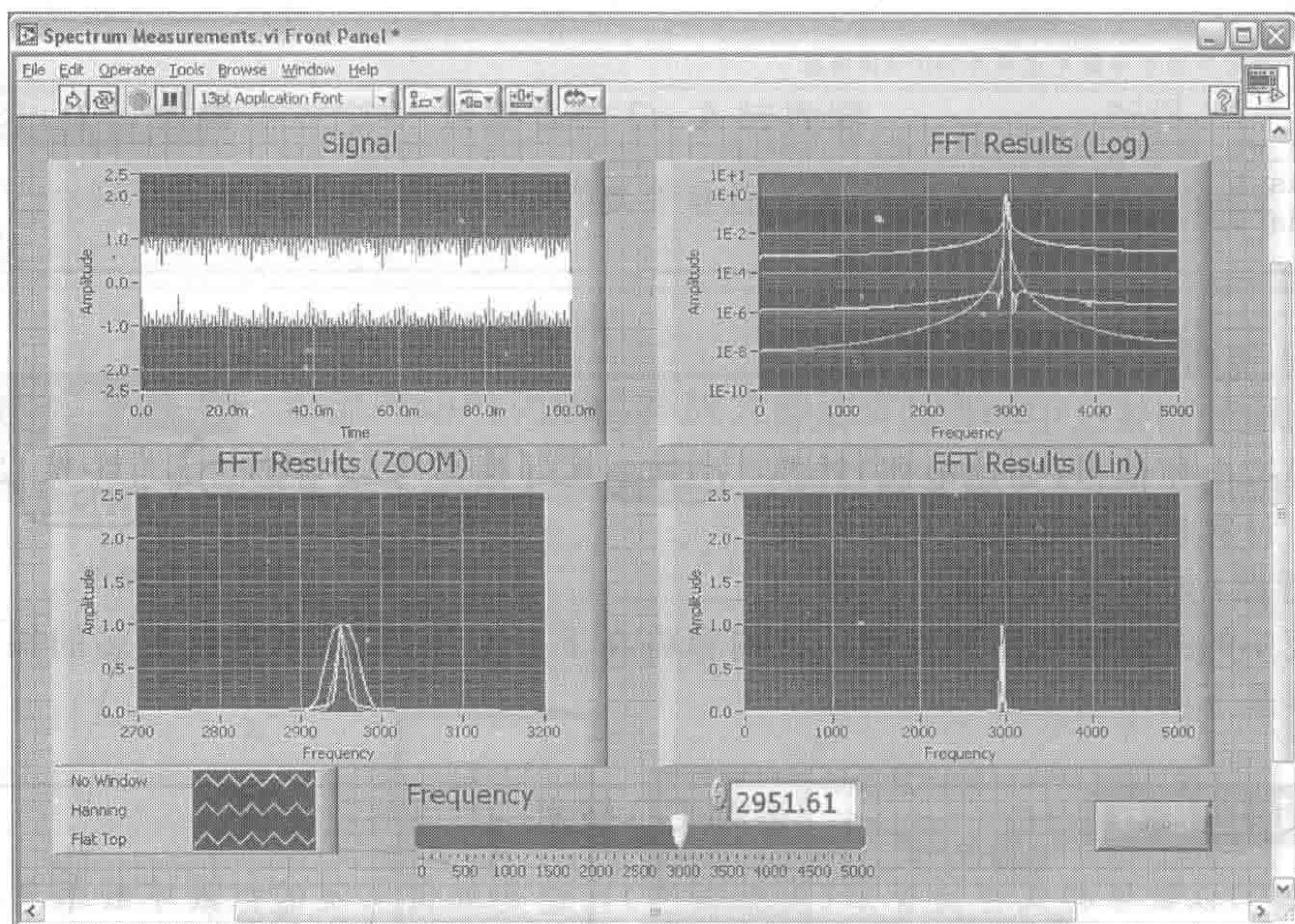


图 8-15 由 LabVIEW 创建的图形用户界面

LabVIEW 除了虚拟仪器和数据采集功能以外，还提供了很多基于模型控制系统设计的工具。这些工具可根据测试数据对系统进行建模(这个过程称为**系统辨识**)、设计一个系统的控制器、模拟系统对各类控制输入的响应以及将控制器嵌入到硬件中执行实时控制。视频演示 8.8 展示了如何应用这些工具开发一个简单的直流电动机速度控制器。LabVIEW 向直流电动机发出指令信号并采集由转速表返回的反馈信号监测电动机的运动结果。视频演示 8.9 提供了更多的应用背景和过程中各个步骤的详细演示。此外，在 11.3 节介绍了控制理论的基础知识。

8.6 实际应用中的注意事项

本节介绍使用 LabVIEW 软件的详细过程和一个采集和显示模拟信号的 USB 数据采集卡，也介绍了采样、显示、回放音频信号的具体工具。提供了 NI USB 6009，一个特定 USB 数据采集模块的详细说明，演示如何在实践中使用软件。实验练习 12 提供了更多的详细内容并探讨了采样率的影响。

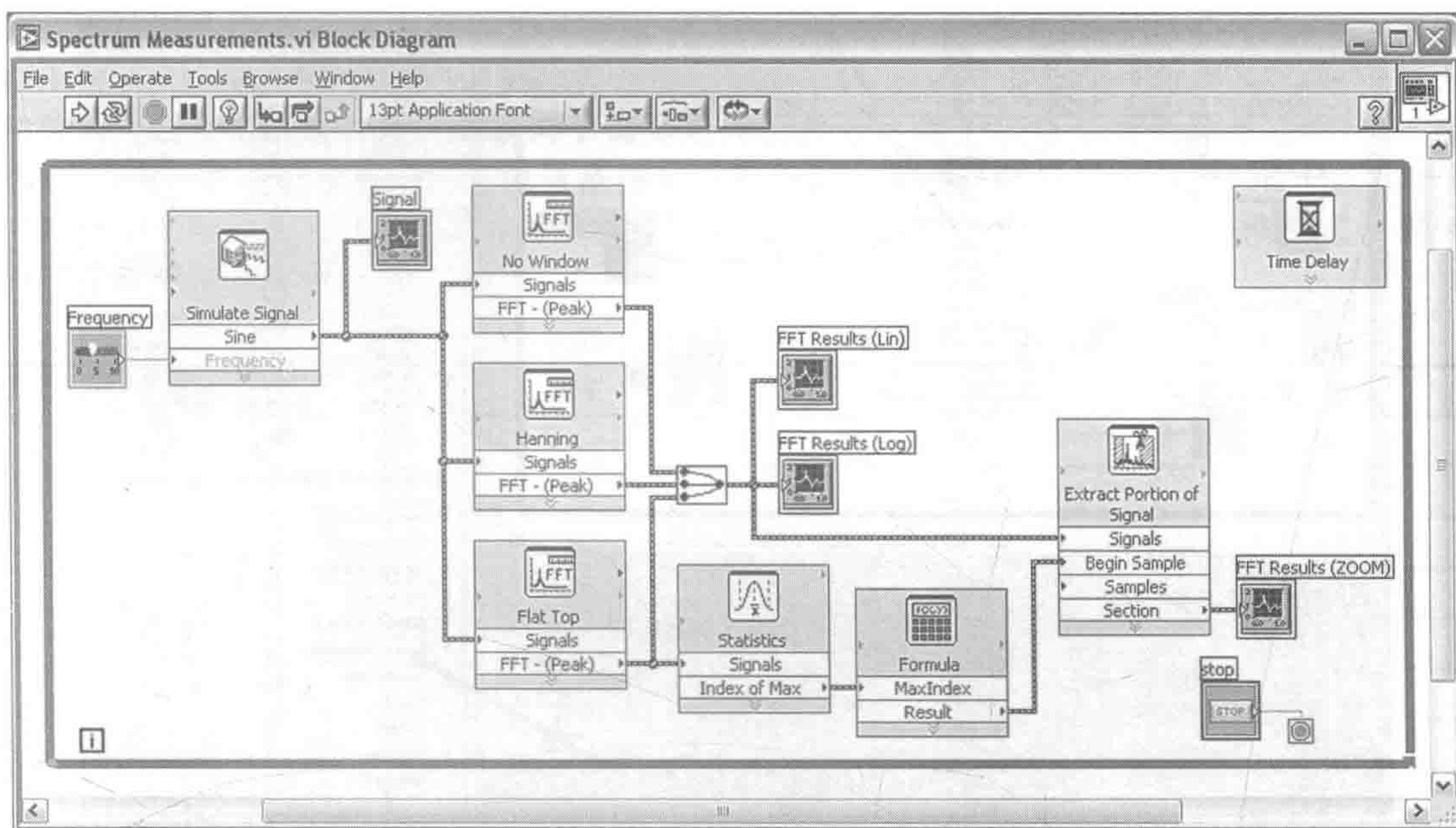


图 8-16 LabVIEW 框图

8.6.1 LabVIEW 程序概述

LabVIEW 是一种友好的图形化编程语言开发环境，它内置了许多数据采集功能并适用于许多商用 DAC 卡。关于 LabVIEW 基础知识的简要介绍如下：

LabVIEW 有两个主窗口，即**程序框图**和**前面板**窗口(见图 8-17 和图 8-18)。程序框图窗口包含需要创建的图形程序，前面板窗口包含用户界面。用户界面用于输入控制参数、运行程序和可视化结果(如绘制波形)。

附加窗口称为**组件库**，包含内置 LabVIEW 的函数库。**函数**组件库是一个可以在框图窗口中使用的功能块库(仅当框图窗口处于激活状态时才可用)。**控件**组件库是前面板可用的函数库(仅当前面板窗口处于激活状态时才可用)。**工具**组件库用于修改光标的功能，不同的工具完成不同的功能。例如，连线工具用于连接两个对象的数据端口，操作值用于更改控件值。自动选择工具将依据光标位置从工具选板中自动选择相应的工具。

一个 LabVIEW VI 文件由互连的**对象**(功能块)组成。它们有两类对象：**节点**和**接线端子**。节点是程序执行元素，能够执行数字信号的采集、乘法运算和信号处理等功能。接线端子是程序框图和前面板之间进行数据传输的接口。前面板中的所有内容都显示为框图上的接线端子。前面板和框图程序中每个对象都有输入、输出和确定其功能的参数。例如，一个 A-D 转换模块有一个模拟信号作为输入(硬件输入)，数值信号作为输出及采样率等参数。A-D 转换模块的输出能够作为图形显示子控件(端子)的输入。端子的参数可以通过不同方式进行设置。一种方法是通过右击和选择属性打开模块的属性窗口并输入参数值。某些参数不能更改为其他参数，例如，定义模块的结构或模式的参数只能在属性窗口中设置。A-D 转换模块的采样率和采样数等参数可以单独使用输入属性进行设置。通常使用**常数**或**控制**接线端子实现参数设置，其中常数在框图中设置，控制在前面板中设置。图 8-17 中的左侧窗口包含了控制模块，如显示时间，输入频率和采样率。图 8-18 显示了在前面板中相应的控件。这些图形定义的 VI 文件用于控制 NI USB 6009 DAC 卡完成 A-D 转换。

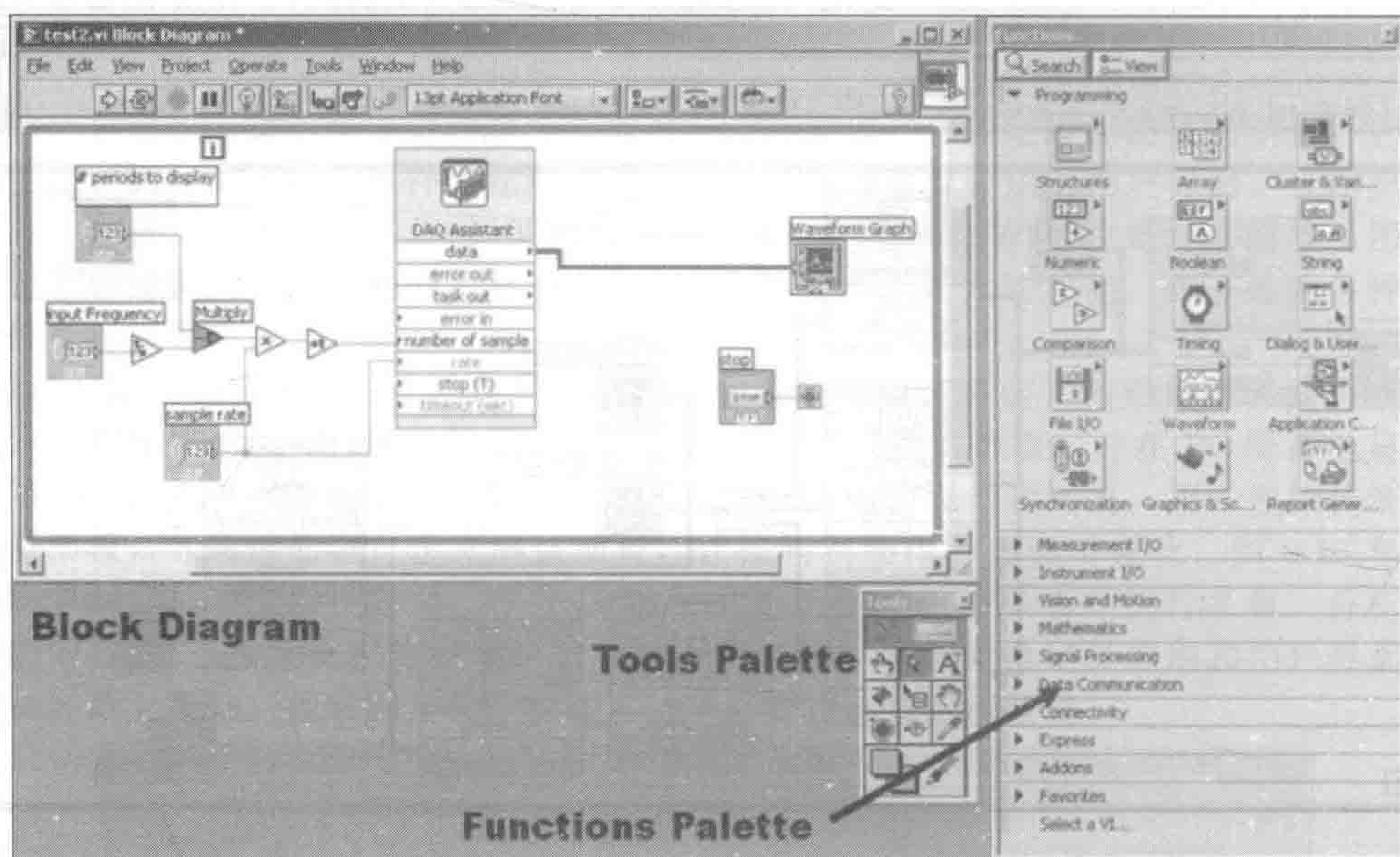


图 8-17　程序框图

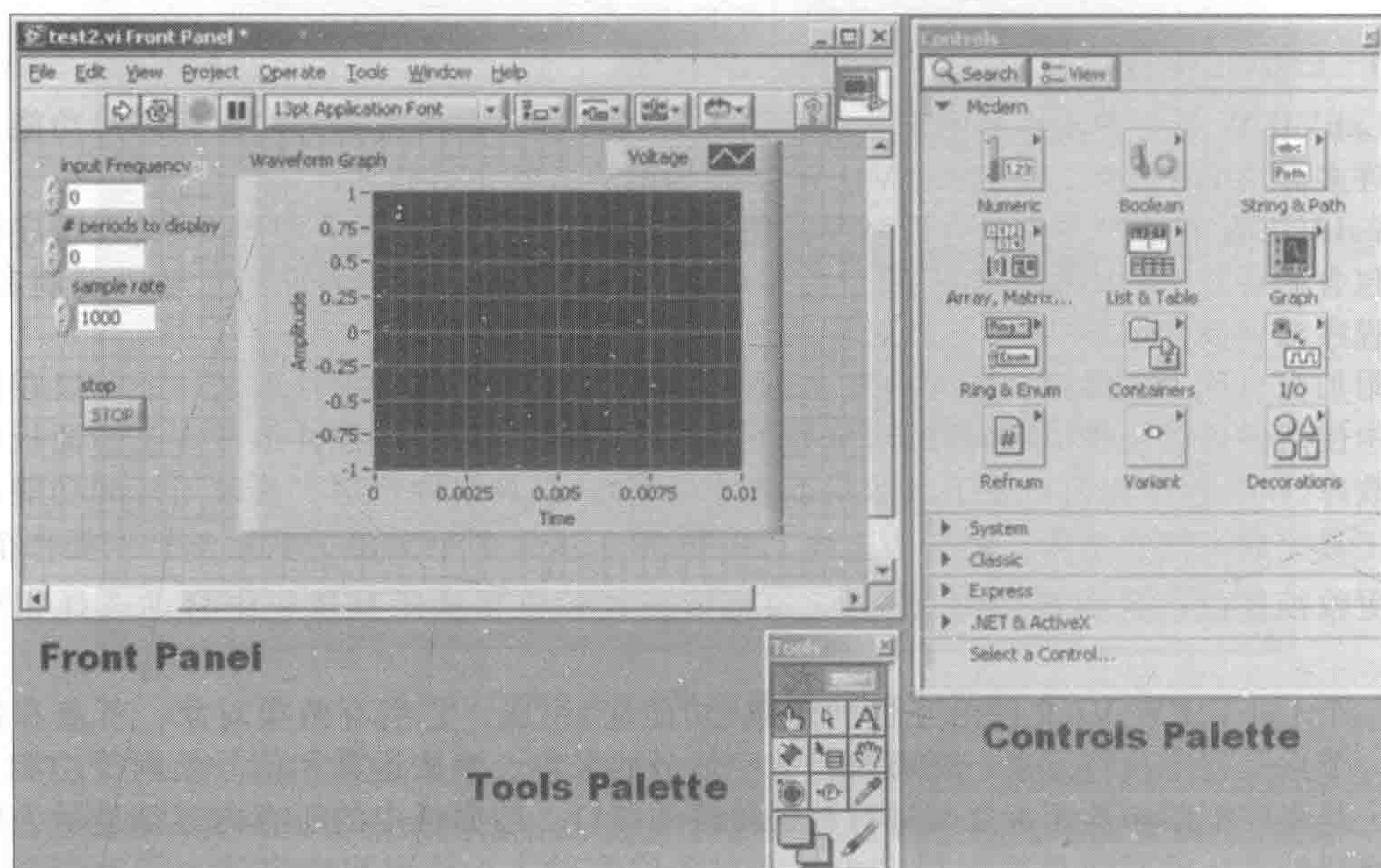


图 8-18　前面板

8.6.2　USB 6009 数据采集卡

NI USB6009 是一种典型的小型外部数据采集卡，通过 USB 接口可将采集卡连接到计算机上，如图 8-19 所示。它具有 A-D 转化、D-A 转化、数字 I/O 和计数器/定时器功能。采集卡的 I/O 端口配置成可拆卸的螺钉式接线端子，每个端子外接电线线径范围是 16～28AWG。

如表 8-2 和表 8-3 所示，端子 1～16 用于模拟 I/O，端子 17～32 用于数字 I/O 和计数/定时器功能。需要注意的是，模拟输入分为单端模式(也可称为 RSE)和差分模式。在单端模式下，正电压信号连接到采集卡的 AI 端，负电压或地信号连接到采集卡的 GND

端。在单端模式下，每个模拟输入通道需要两个端子，故采集卡有 8 路模拟输入可用(AI0～AI7)，在这种模式下最大输入电压范围为－10～10V。在差分模式下可以获得更大的输入电压范围，这种模式测量两个信号之间的差分，两个信号分别是参考地的 AI＋端和 AI－端。在差分模式下测量电压范围可达到－20～20V，但是每个引脚(AI＋或AI－)对地的最大电压为±10V。因为差分模式比单端模式多使用一个端子，所以该模式采集卡有 4 个模拟输入通道。

表 8-2　USB 6009 的模拟(1～16)和数字(17～32)引脚

模块	端子	信号，单端型	信号，差模
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0−
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1−
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2−
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3−
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

模块	端子	信号
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PFI 0
	30	+2.5V
	31	+5V
	32	GND

表 8-3　USB 6009 的信号描述

信号名称	参考	方向	描述
GND	—	—	地—单端 AI 测量的参考点，差分测量的偏置电流返回点，AO 电压、数字 I/O 信号、＋5V 直流电源和＋2.5V 直流电源的参考
AI＜0..7＞	变化	输入	模拟输入通道 0～7—对于单端测量，每个信号是一个模拟输入电压通道。对于差分测量，AI0 和 AI4 是差分模拟输入通道 0 的正负输入。下列信号对也构成差分输入通道：＜AI1，AI5＞、＜AI2，AI6＞和＜AI3，AI7＞
AO 0	GND	输出	模拟通道 0 输出—提供 AO 通道 0 的电压输出
AO 1	GND	输出	模拟通道 1 输出—提供 AO 通道 1 的电压输出
P1.＜0..3＞ P0.＜0..7＞	GND	输入或输出	数字 I/O 信号—可单独配置每个信号作为输入或输出
＋2.5V	GND	输出	＋2.5V 外部参考—回路测试参考电压
＋5V	GND	输出	＋5V 电源—提供＋5V，输出电流最高可达 200mA
PFI 0	GND	输入	PFI 0—该引脚可配置为数字触发器或事件计数器的输入

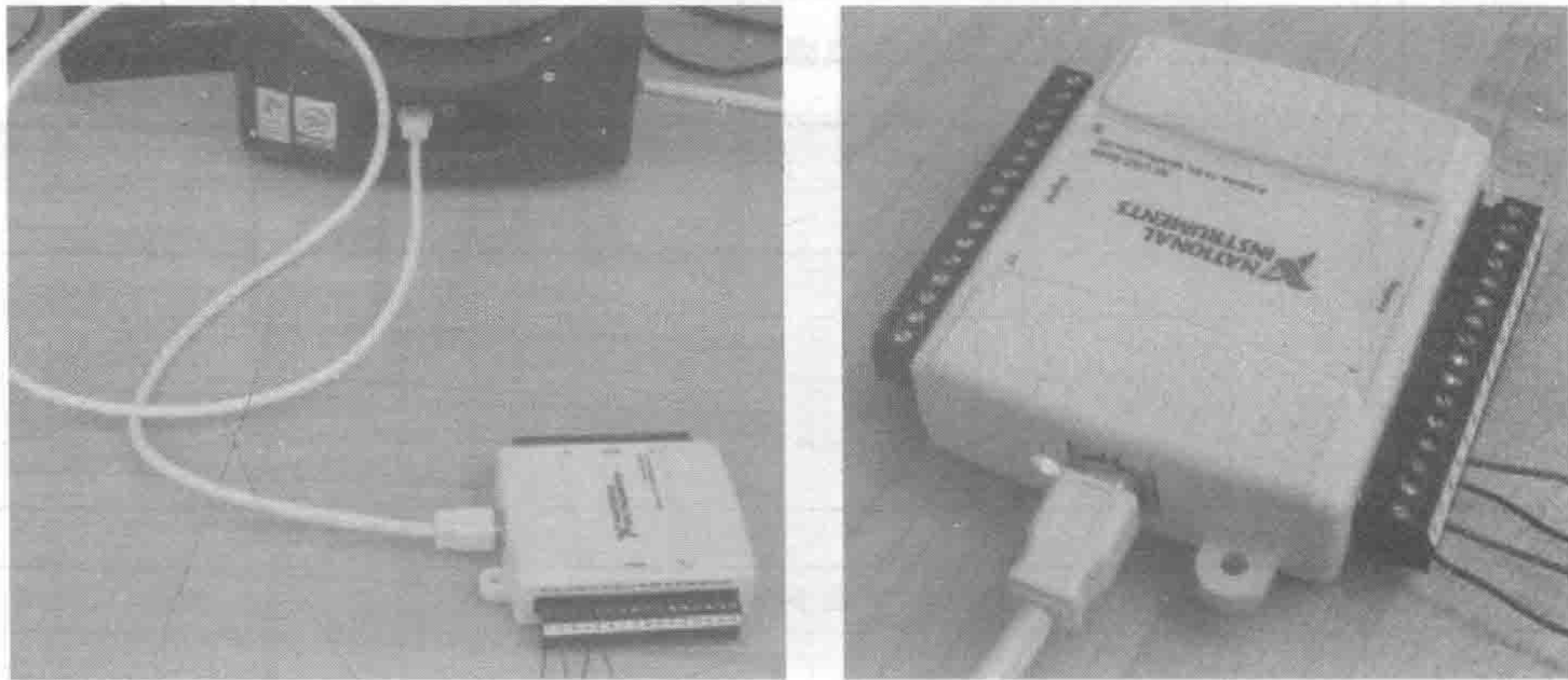


图 8-19　USB 6009 连接到具有螺丝终端的计算机

差分和单端模式的另一个区别是模拟输入的分辨率。差分模式的分辨率为 14 位，而单端模式具有 13 位分辨率。

模拟输入转换器的类型是逐次逼近的，最大采样率为每秒采 48 000 个样本。该器件包含每个输入可多路复用的 A-D 转换器。

8.6.3　创建一个 VI 和采样音乐

这个例子是基于 LabVIEW 8 版本的，应该与以前或以后的版本兼容。假设 USB 6009 与计算机的接口已经配置完成。

打开一个空白的 VI 文件

1. 打开 LabVIEW。开始＞程序＞National Instruments＞LabVIEW8.0＞LabVIEW。

2. 点击空白 VI 区创建一个新项目。将出现框图和前面板窗口。如果只有一个打开，可在窗口目录下点击 Show Block Diagram 或 Show Front Panel。一些其他小窗口也可以打开。

3. 打开函数组件库。从视图菜单下的框图窗口点击 Functions palette 去打开函数组件库。

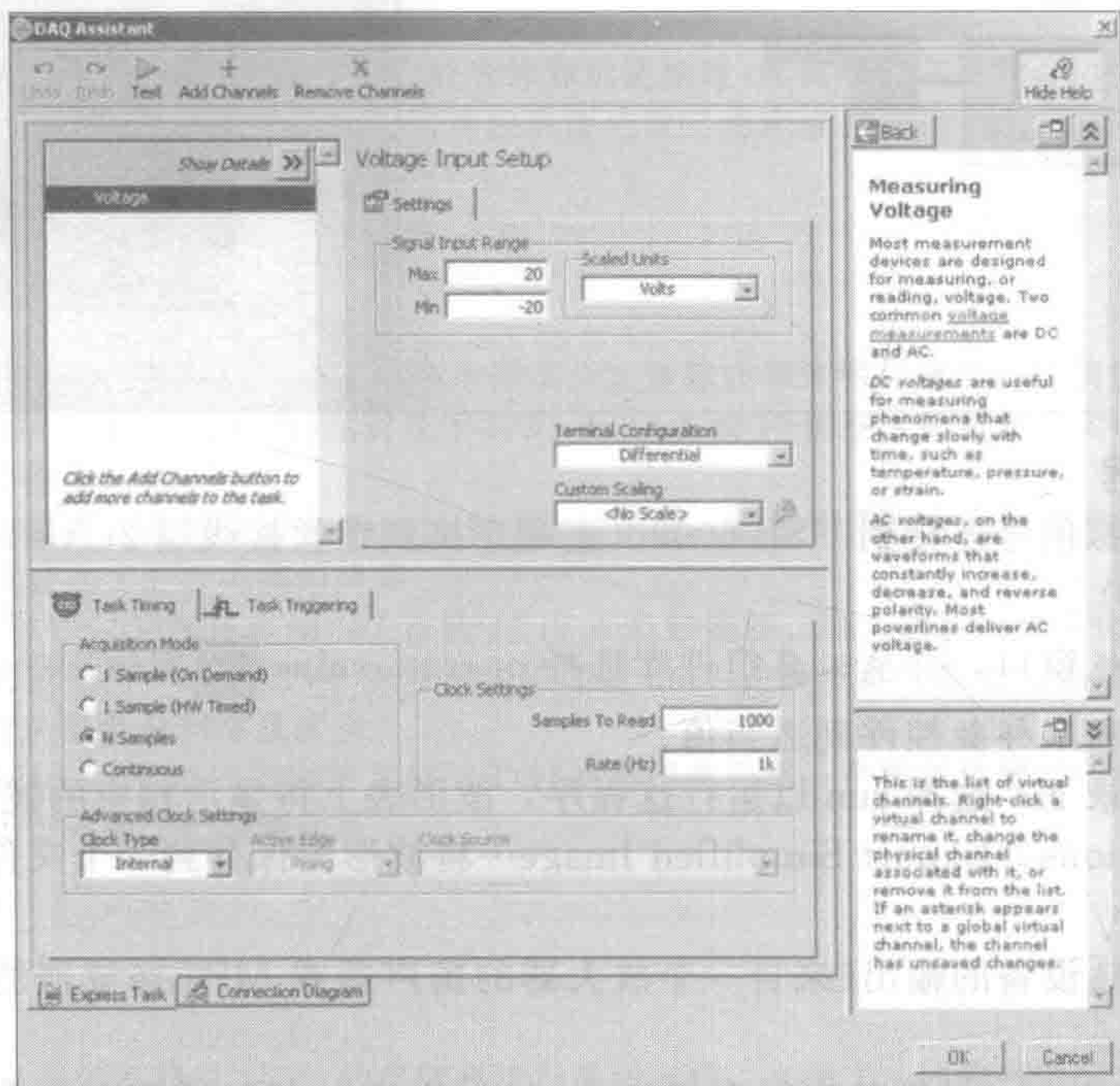
创建节点模块

1. 从函数组件库中选择 Measurement I/O＞NI-DAQmx。拖曳 DAQ Assist 图标到框

图上，出现 DAQ 助手窗口。

2. 将 USB 6009 设备连接到计算机上。绿灯应开始闪烁。从 DAQ 助手窗口中选择 Analog Input>Voltage>ai0>Finish。如果不出现 ai0，请按“Dev1(USB-6009)”旁边的加号来显示可用的模拟输入通道。

3. 打开一个新窗口以显示 DAQ 助手的属性块(如下所示)。



4. 在 Settings 下，根据输入幅值和所需的量化值，设置信号输入范围的最大值和最小值。

5. 在 Settings 下，设置到 RSE 的终端配置(单端模式)。

6. 在 Task Timing 标签下，设置 N 个样本的采集模式。接线图可以通过向窗口底部选择连接图选项卡来查看，假设已选择了合适的范围(max≤10 和 min≥−10)。

7. 选择 Ok 关闭 DAQ 助手属性窗口。后面可以通过右击 DAQ 助手模块打开。

创建接线端子

1. 从 Tools 调色板(或自动图标)中选择绕线盘图标。在 DAQ 助手块中右击比率输入(块边上的箭头)和选择 create>control。一个标记 rate 的块应该出现一个连接到 DAQ 助手块的导线。

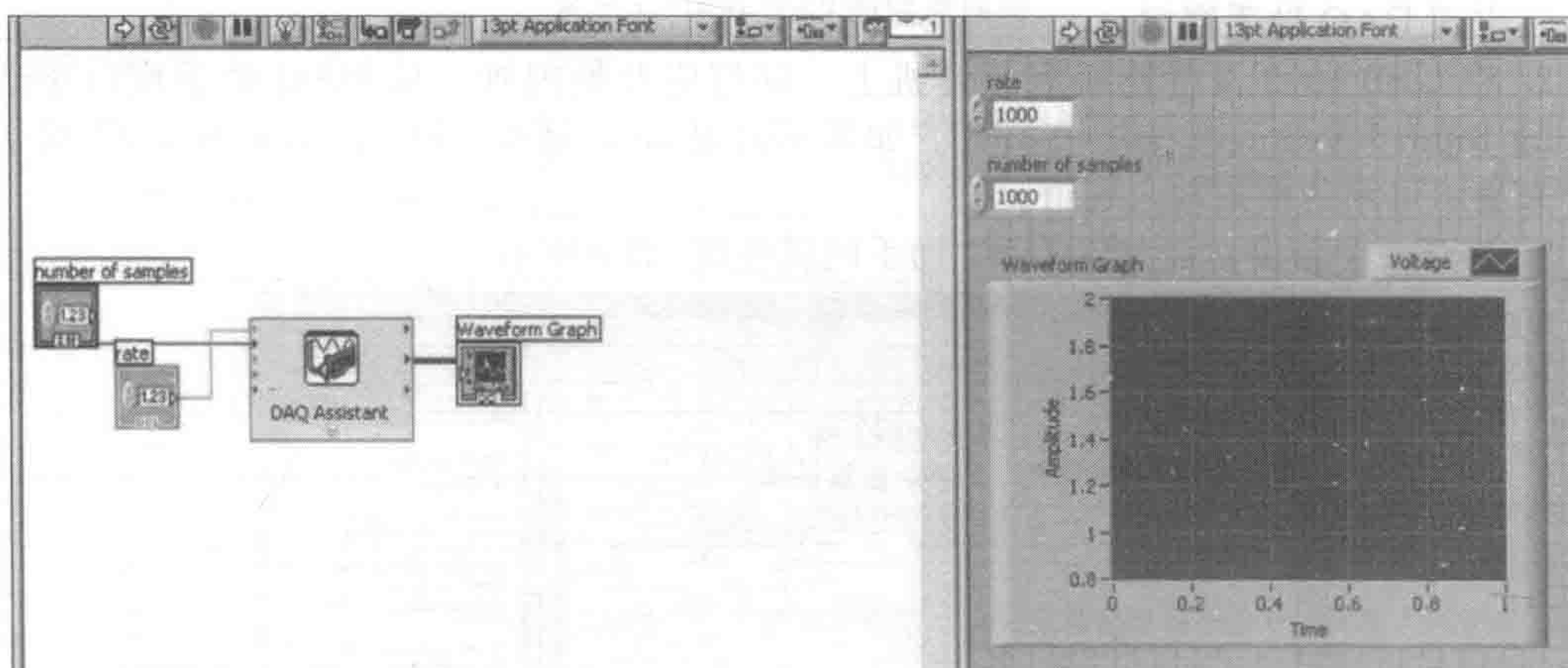
2. 输入样本数，重复这个为样本数输入创建一个控制，这两个控制将出现在前面板窗口中。

3. 如果没有打开的话，需激活前面板窗口和打开控制组件库。从视图菜单下的前面板窗口选择 *Controls Palette* 去打开控制组件库。

4. 从控制组件库中选择 *modern>graph* 和拖曳 *Waveform Graph* 图标到前面板窗口。一个有标签“Waveform graph”的块将出现在 *Block Diagram* 窗口。

5. 右击图表和选择属性。在 *Scales* 标签下选择下拉菜单顶部的 Amplitude(Y-axis)。取消选择 Autoscale 并且在 DAQ 助手块中选择用于信号输入范围的最大/最小值。点击 OK 关闭属性窗口。

6. 选择框图窗口和在工具组件库上的绕线盘图标。点击 DAQ 助手的数据输出，随后点击 Waveform Graph 块。一个导线将连接这两个块，就和下面窗口一样了。



采集模拟信号

1. 将一个模拟信号连接到 USB 6009。正端连接到螺丝接线端 2(AI0)，负端连接到螺丝接线端 1(GND)。

2. 选择前面板窗口，并从工具组件库选择 operate value 图标。

3. 设置比率和采样数控件到适当值。

4. 在操作目录下，选择 run 以运行这程序，波形表上将显示相应的波形。右击波形和选择 Data Operations>Export Simplified Image…将波形图保存到一个文件中。

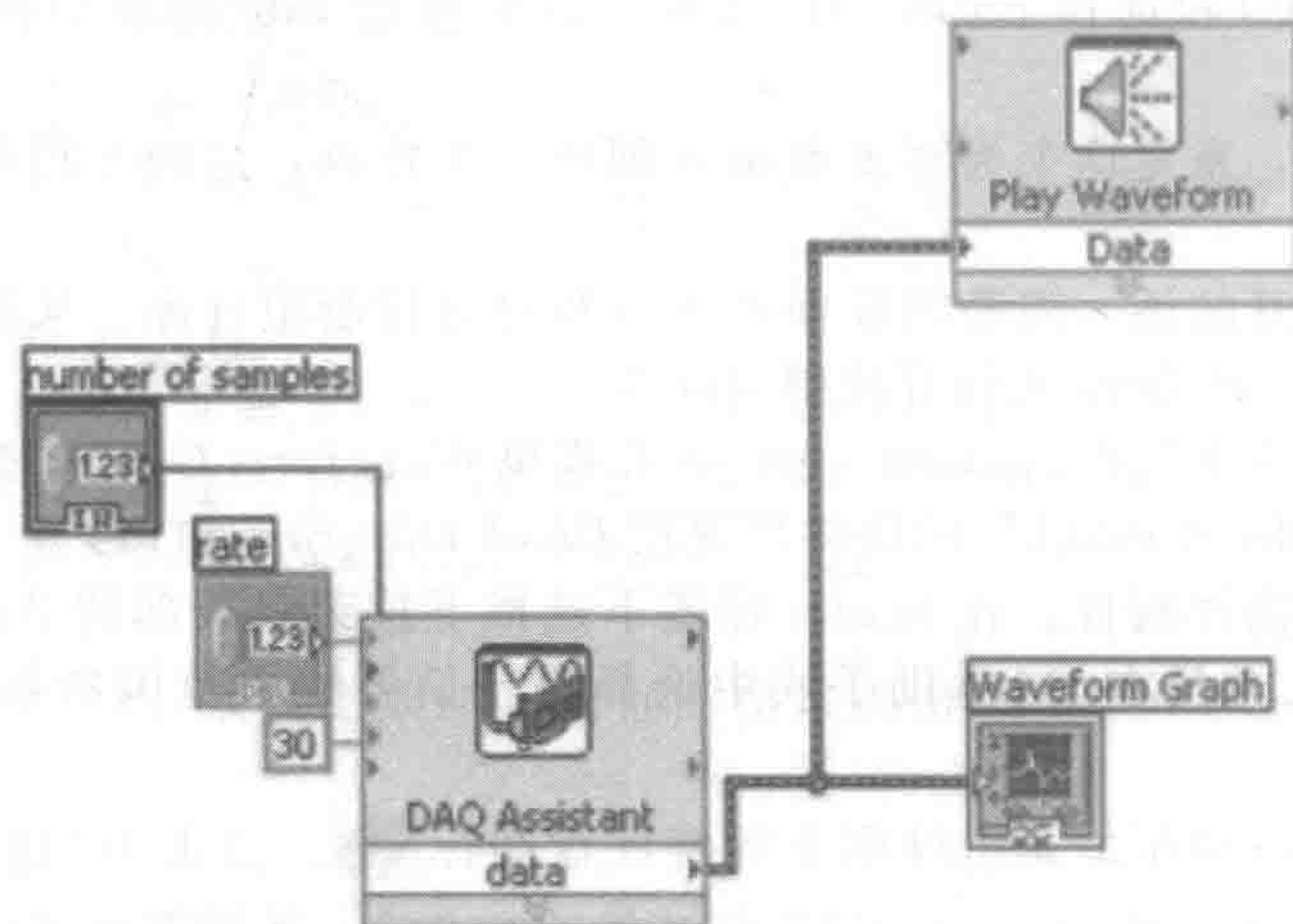
采集音乐

1. 将一个音频设备的输出(来自一个放大器的扬声器或 MP3 播放器的耳机线)连接到 USB 6009 的输入。

2. 选择 44 000kHz(标准的高保真采样率)的采样率以获取所有未混叠的样音频频率。由于人耳听觉通常局限于 20Hz～20kHz 范围。任何小于或等于 40 000 的采样率(来自香农采样定理)可能会导致混叠(差的保真度)。

3. 添加 Play Waveform 块到块图中，可以在功能组件库找到：Programming、Graphics and Sound、Sound、Output。在配置对话框窗口出现时按 “OK” 确定。Play Waveform 块的输入连接到 DAQ 助手块的数据输出。创建一个恒定的 DAQ 助手的超时输入(相同方法用于创建输入速率的控制)和设置为 30(字母图标需要从工具调色板中选择)。设置超时为 30，允许高达 30s 的音乐记录，其框图如下所示。

4. 采集音乐波形并听录音。



视频演示 8.5 展示了过程中的所有步骤，包括在不同采样率下播放采样音乐。视频演示 8.7 更详细地说明了采样效果，也演示了降低分辨率的影响。LabVIEW 各方面优秀的在线教程可以在网络链接 8.6 中找到。

问题和练习

8.1 为什么不能直接将传感器(如热电偶、应变计和加速度计)连接到数字计算机或微处理器上？

8.2 假设一个音频声带的带宽为 15kHz，若高保真度的数字化声带在音频 CD 上存储，则需要的最小采样率是多少？

8.3 假设你想将来自下列的源信号数字化：

a. 热电偶感测的室内温度

b. 立体声放大器的输出

在每一种情况下你会选择的最小采样频率是多少？请陈述和证明你做出的任何假设。

8.4 绘制函数 $V(t)=\sin(t)+\sin(2t)$ 在对应于 1/3、1/2、2 和 10 倍奈奎斯特频率的时间间隔的两个周期上的波形，并得出结论。

8.5 生成例 8.1 中采样间隔分别为 0.5s、1s 和 10s 的函数，并根据采样定理解释结果。

8.6 对课堂讨论项目 8.2 进行完整的回答。

8.7 给定一个在 −5V～5V 电压范围内工作的 12 位 A-D 转换器，输入电压通常变化多少可以被检测到？

8.8 一个信号值的范围为 −5～+5V，你希望用不超过 5mV 的模拟量化值进行测量，完成此任务的 A-D 转换器需要的最低分辨率是多少？

8.9 如果一个具有 0～10V 电压范围的 8 位 A-D 转换器用来采集一个模拟传感器的电压，什么数字输出代码将对应于下列每个传感器值？

a. 0.0V

b. 1.0V

c. 5.0V

d. 7.5V

8.10 一个 12 位 A-D 转换器以 5kHz 的采样率进行采样操作，存储 10s 的传感器信号将需要多大的计算机内存(以字节为单位)？

8.11 利用表 8-1 中的真值表推导式(8-6)和式(8-7)。

8.12 对于一个 5 位转换器，如果输入信号是 2.25V 且输入范围为 −5～5V，生成一个类似于图 8-10 所示的图，正确的数字输出是多少？

8.13 随着机电一体化设计逐步从 8 位、10 位到 12 位 A-D 转换器的发展，在数据采集系统设计中可能会出现的问题是什么？

8.14 访问微芯公司网站(www.microchip.com)和查找 A-D 转换器的 MCP32X 系列规格，它们的分辨率是多少？获得模拟值的二进制表示使用什么类型的体系结构？

8.15 使用网站查找美国国家半导体的产品 ADC0800 8 位 A-D 转换器的规格，确定执行转换需要的最大采样率和方法，并定义每个输入和输出。

8.16 证明式(8-13)。

8.17 证明式(8-14)。

8.18 证明式(8-15)。

8.19 对课堂讨论项目 8.5 进行完整的回答。

8.20 对课堂讨论项目 8.6 进行完整的回答。

参考文献

Datel Intersil, *Data Acquisition and Conversion Handbook*, Mansfield, MA, 1980.

Gibson, G. and Liu, Y., *Microcomputers for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980.

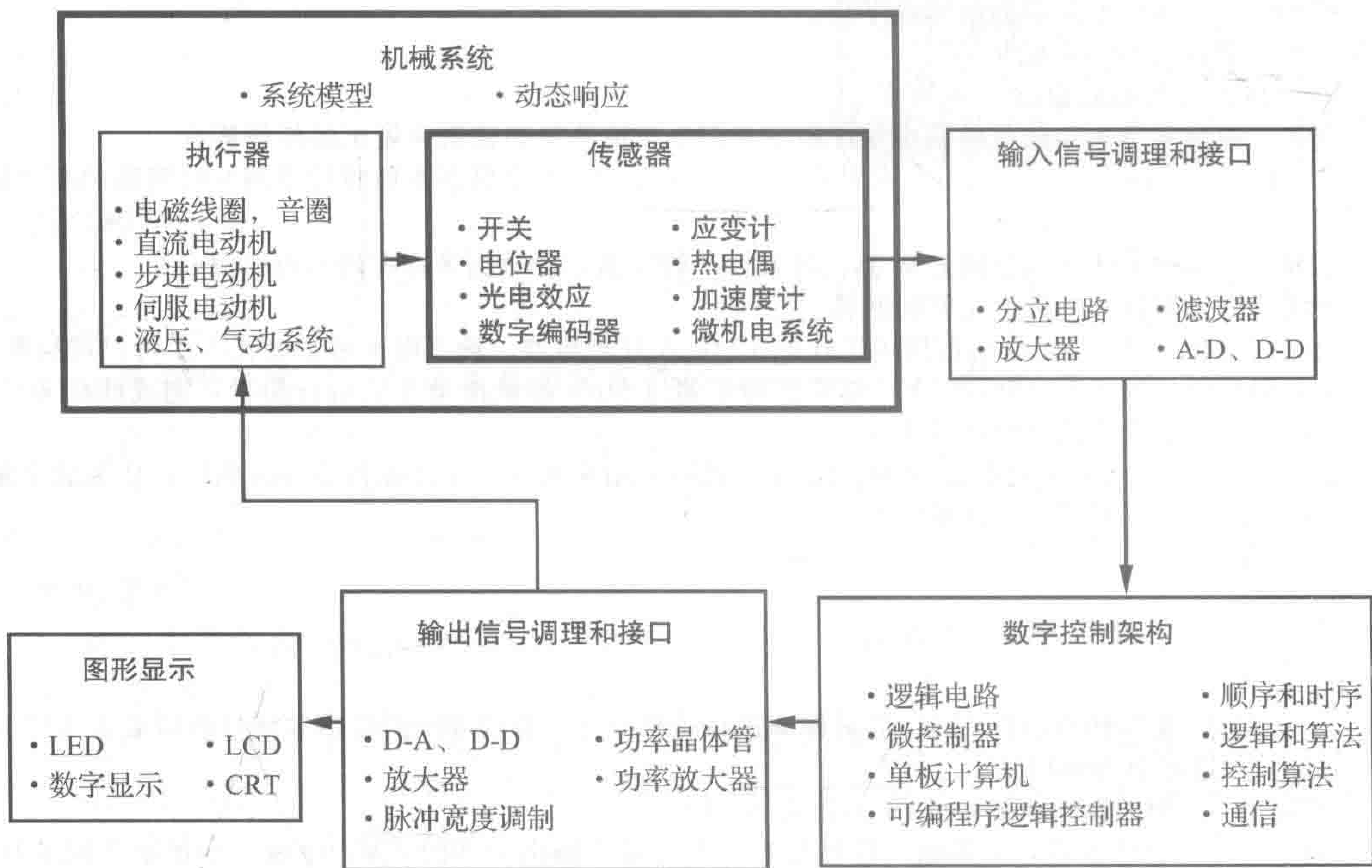
Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics*, 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1989.

O'Connor, P., *Digital and Microprocessor Technology*, 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

第9章

传　感　器

本章节介绍了各种传感器在机电一体化系统设计中的重要性。



本章目标

在阅读、讨论、学习和应用本章的知识后，能够：

1. 了解简单的机电传感器的基本原理，包括接近传感器和开关、电位器、线性可变差动变压器、光学编码器、应变计、称重(压力)传感器、热电偶和加速度计；
2. 能够描述如何使用自然和二进制代码来编码数字编码器中的线性和旋转位置；
3. 能够运用工程力学原理来解释来自单一应变计或应变花的数据；
4. 能够使用热电偶准确测量温度；
5. 知道如何测量加速度和理解加速度计的频率响应；
6. 了解什么是微机电系统(MEM)。

9.1 引言

传感器是机电一体化或测量系统中的一个基本单元，它检测物理参数的大小，并将其转换成系统可以处理的信号。通常传感器中的有源器件称为**变送器**。监测和控制系统要求传感器测量一些物理量，如位置、距离、力、应变、温度、振动和加速度。下面几节将介绍测量这些物理量的设备和技术。

关于传感器和变送器的设计总是涉及一些原理应用，并涉及一些与测量有关的物理或化学原理。附录B概括了大量应用于传感器及变送器设计的物理原理，也提供了一些应用实例。此列表对于寻找物理量测量方法的变送器设计者非常有用。实际应用中每一个变送

器都会用到一个或多个这样的原理。

网络链接9.1提供了众多商用传感器和变送器的供应商和在线资源的链接。因特网是机电领域寻找最新产品的有效资源，尤其是传感器产品，其新技术的应用和改进一直在持续不断地进行中。

9.2 位置和速度测量

除了电气测量(如电压、电流、电阻)之外，在机电一体化系统中最常见的测量量是位置。为了控制系统，我们经常需要知道一个系统中各个部分所处的位置。9.2.1节介绍的接近传感器和限位开关，是一种位置传感器，检测是否接近或已经达到行程的极限。9.2.2节介绍电位器，这是一种廉价的测量旋转或线性位置的模拟装置。9.2.3节介绍线性可变差动变压器，它是一种能够准确测量直线位移的模拟装置。最后，9.2.4节介绍数字编码器，它可以直接连接到计算机或其他数字系统，用来测量位置并用数字形式输出。

因为大多数应用涉及测量和控制轴旋转(例如，在机器人关节、数控车床和轧机轴、电动机和发电机中)，所以旋转位置传感器比线性传感器更常见。而且，线性运动通常可以很容易地转化为旋转运动(例如，皮带、齿轮或车轮机构)，因此在线性运动中可使用旋转位置传感器。

速度测量可以通过在已知的时间间隔进行连续的位置测量和计算位置变化的时间速率来获得。转速表是一种测量旋转轴速度的速度传感器。

9.2.1 接近传感器和开关

一个接近传感器包含这样一个元件，当接近它时可改变其状态或产生一个模拟信号，接近传感器往往与被测对象间没有实际接触。磁、电容、电感和涡流的方法特别适合于用在接近传感器的设计中。视频演示9.1显示磁性接近传感器的应用示例。**光电子发射探测器对**是另一种检测方法，它采用一束光的反射或中断以非接触方式检测物体。发射器可以是激光或聚焦的LED，探测器通常是光敏晶体管或光敏二极管。光电子发射探测器对的不同结构如图9-1所示。在对射和反射结构中，检测对象中断光束；在接近配置中，物体反射光束。图9-2显示了一个商用传感器，可用于反射或接近配置。视频演示9.2展示了一个有趣的由学生设计的接近传感器应用项目实例。接近传感器和限位开关的应用包括检测对象的有无(例如，在一个公共小便池前的一个人)、对运动物体计数(例如，通过传送带传送)、限制一个机构的行程(如通过检测滑块或接头的行程端点)。

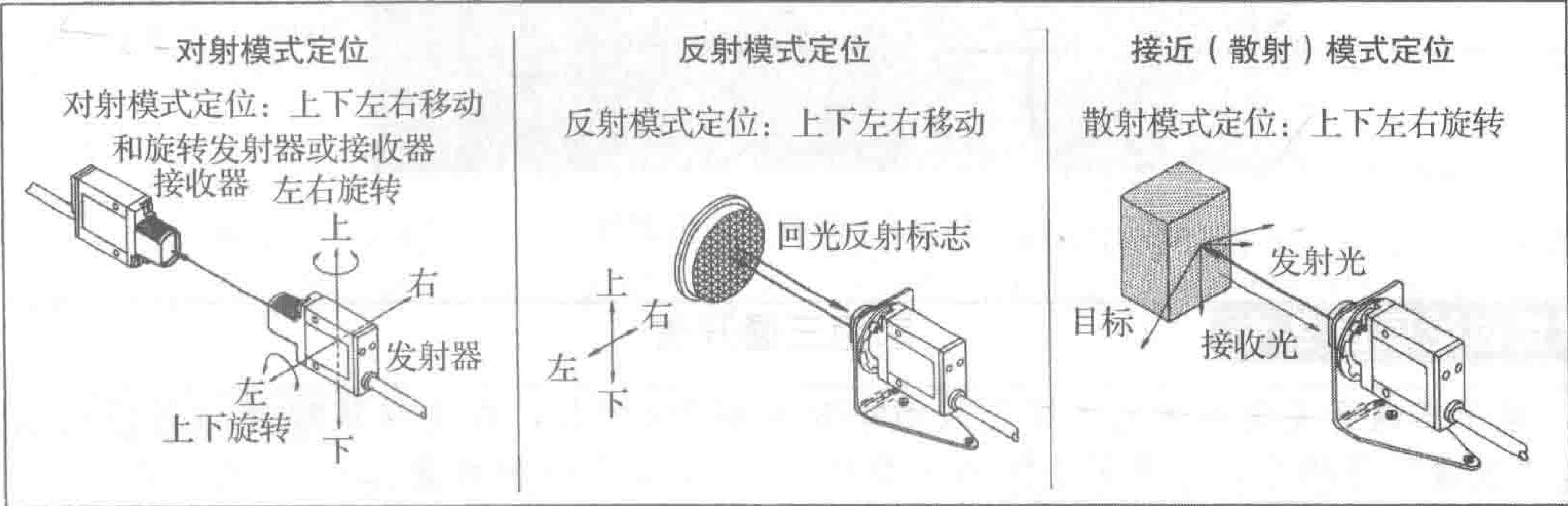


图9-1 不同结构的光电子发射探测器对(资料来源于美国邦纳公司)

限位开关有许多种设计，包括按钮和杠杆微动开关。所有开关可以打开或关闭电路内的连接。如图 9-3 所示，开关的特点是由触杆(P)和触点(T)的数量决定的，连接方式有**常开(NO)**和**常闭(NC)**。**触杆**是开关中的一个移动元件，它使能或断开连接，而**触点**是触杆的接触点。SPST 是单刀(SP)单掷(ST)开关，它打开或关闭一个连接。单刀双掷开关(SPDT)的触杆位置在不同的触点位置之间动作。开关的触杆和触点配置多种多样，但它们的功能很容易从基本术语中理解。图 9-4 和视频演示 9.3 显示了各种类型的开关。视频演示 9.4 显示了一个有趣的例子，当双金属条线圈旋转一定角度时，一个常开水银开关即可打开或关闭空调或加热单元(见 9.4.2 节)。

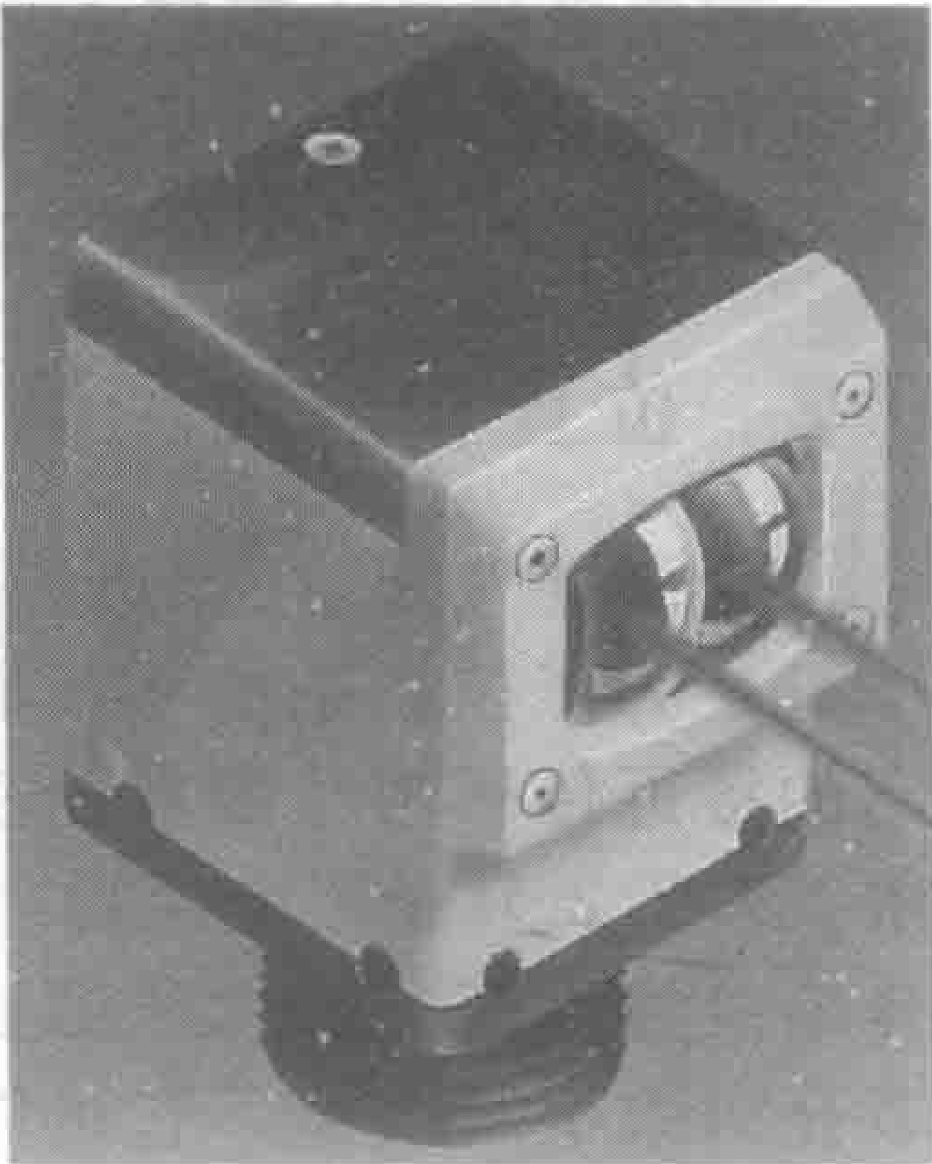


图 9-2　一个外壳的光电子发射探测器对（资料来源于美国邦纳公司）

当机械开关打开或关闭时，它们会表现出开关抖动，在达到一个新的状态前，这会发生许多断开连接转换。如果一个开关连接到需要单一转换的数字电路，开关输入必须使用一个 6.10.1 节所示的电路或软件去除抖动。

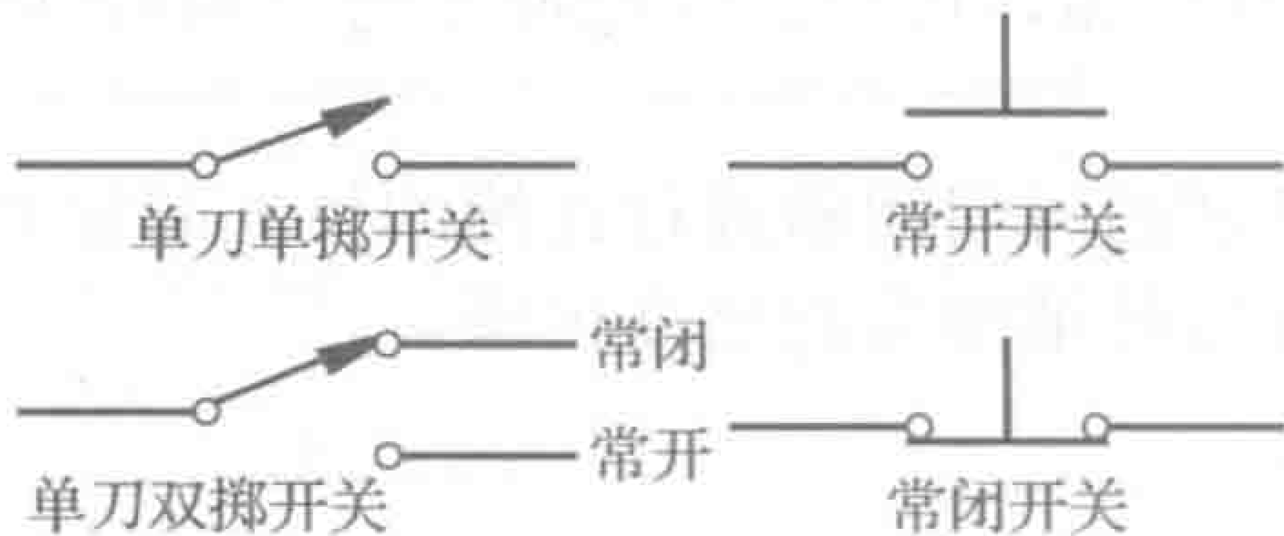


图 9-3　开关

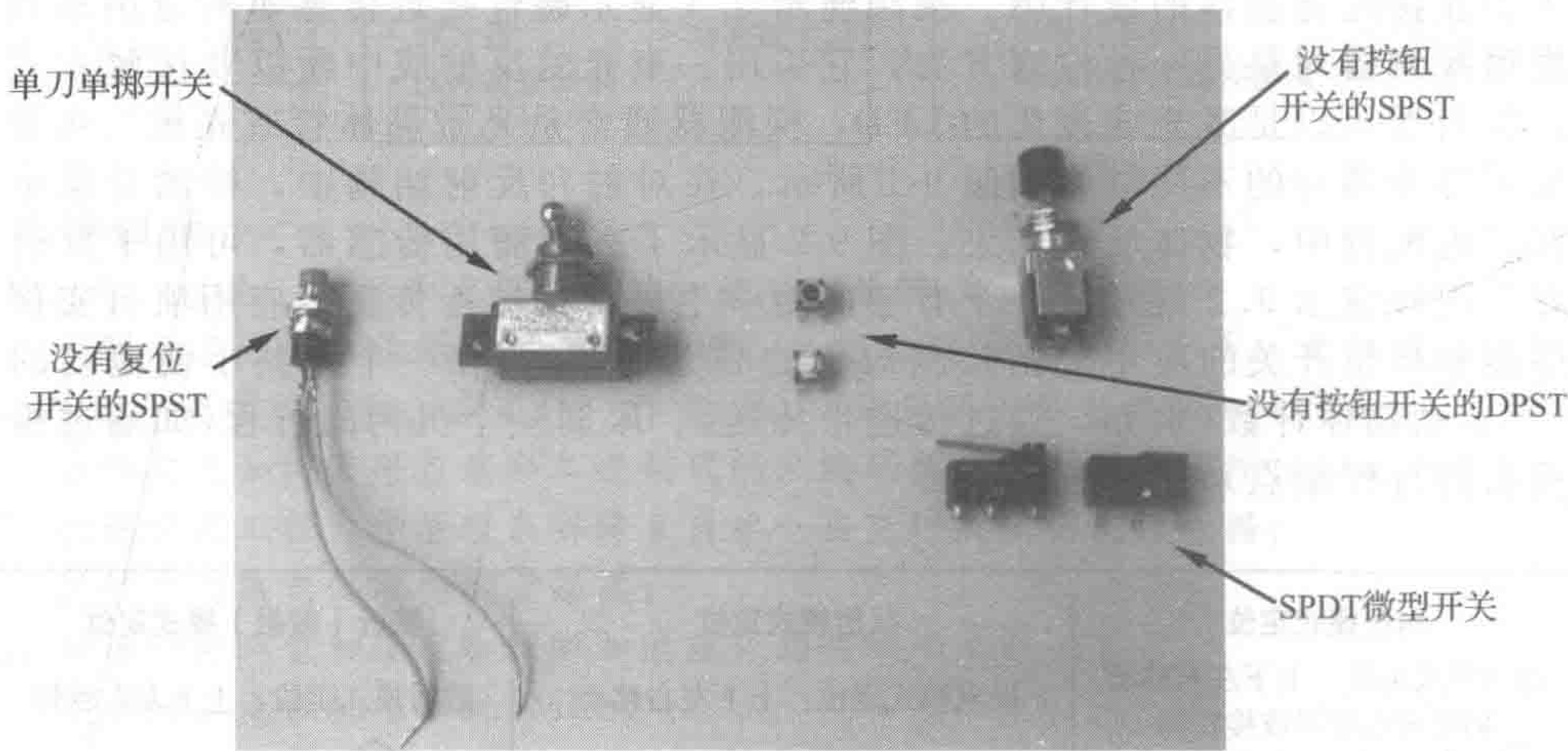


图 9-4　各种开关的照片

课堂讨论项目 9.1　　**家用三通开关**

家用三通开关常用于允许灯光从两个位置控制(例如，在楼梯的顶部和底部)。请注意，“三通”指的是每个开关上的端子数(3)，而不是开关的数量(2)。三通开关属于单刀双掷开关系列。绘制功能示意图说明两个开关如何控制交流电源连接到灯上使得其中任意开关可以打开或关闭灯。

9.2.2　电位器

旋转**电位器**是一种可变电阻装置，可用于测量角位移。电位器通常由电阻体和可移动的电刷组成。当电刷沿电阻体移动时，在输出端即可获得与位移量成一定关系的电阻值或电压。图 9-5 说明了一个典型的旋转电位器的外形和内部示意图。图 9-6 是两种常见类型的电位器。左边的叫**微调电阻**，它的左侧有一个小螺钉，可以用旋具转动它，使电阻值产生微小的改变(即“微调”或调整电阻)。右边是一个标准的旋转电位器，它允许用户用手轻松地调整旋钮。通过电压分压，电位器电阻值的变化可以用来产生与输入位移成正比的输出电压。此关系在 4.8 节已经推导过。

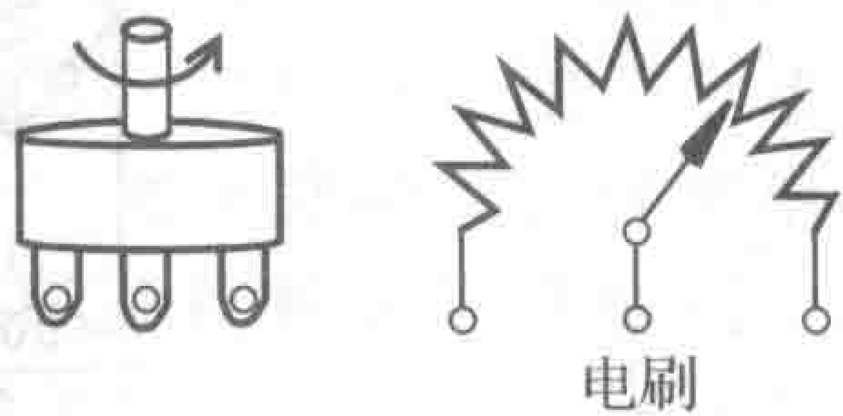


图 9-5　电位器

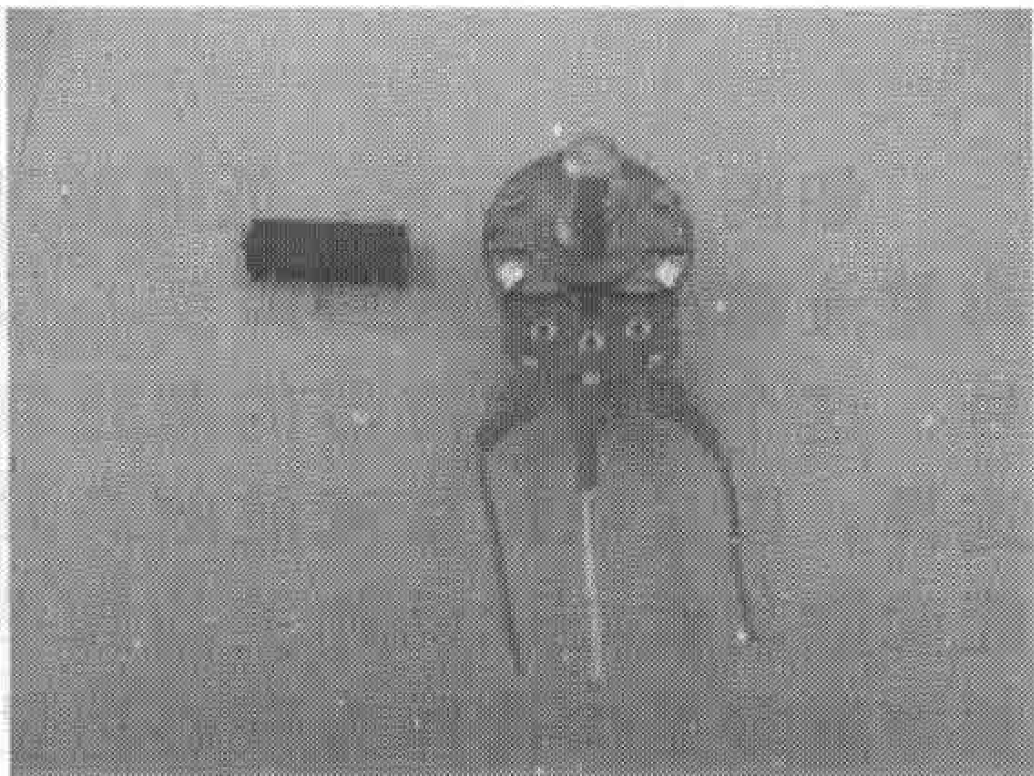
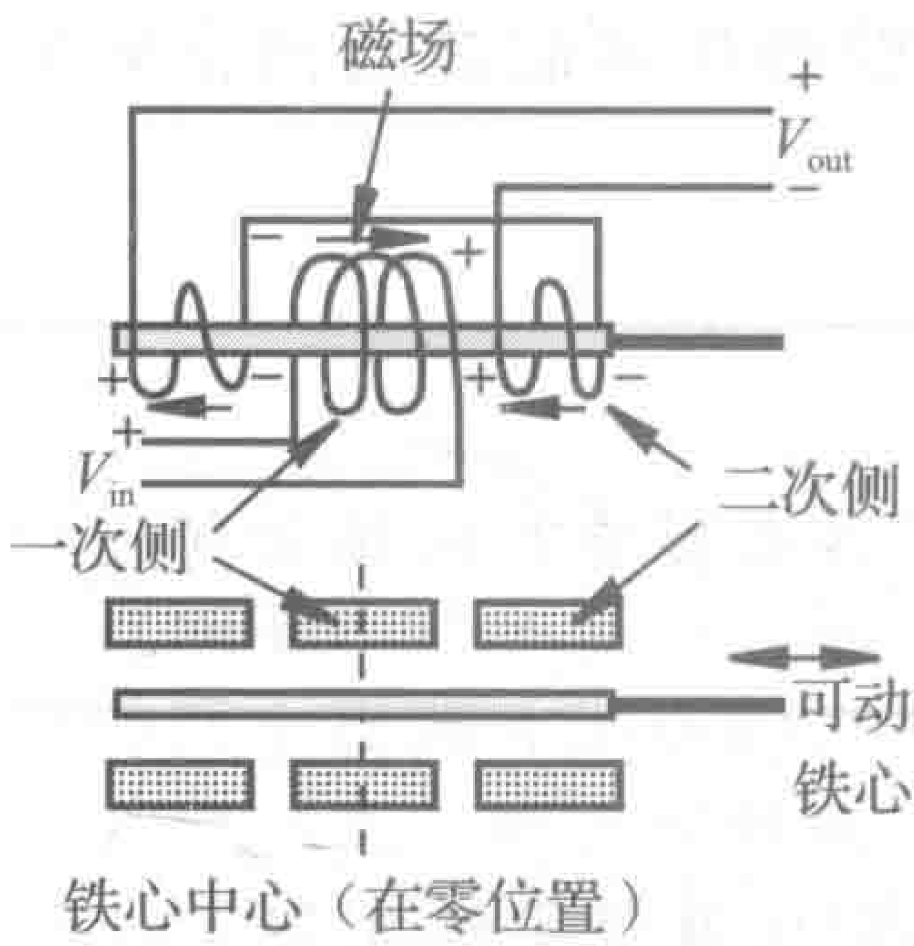


图 9-6　微调电阻和旋转电位器

9.2.3　线性可变差动变压器

线性可变差动变压器(LVDT)是一个测量线性位移的变送器。如图 9-7 所示，它由一次绕组和二次绕组和可动铁心组成。它的功能很像变压器，在二次线圈中产生的感应电压是一次线圈的激励响应。LVDT 必须由交流信号激励以产生二次交流响应。铁心位置可以通过测量二次响应来确定。

如图 9-7 所示，两个二次线圈以反向串联方式连接，输出信号描述铁心运动上的大小和方向，两个不同铁心位置的主要交流励磁为 V_{in}，输出信号为 V_{out}。在铁心上有一个中点，在此处每个线圈感应的电压振幅相同和相位相反(180°)，输出为“零”。当铁心从零位开始移动时，输出幅值在超过零位附近的线性范围内按比例增加，如图 9-8 所示。因此，通过测量输出电压的幅值，可以方便准确地确定铁心位移的大小。网络链接 9.2 演示了一个有趣的动画，说明了 LVDT 的输出电压随铁心位移的变化过程。



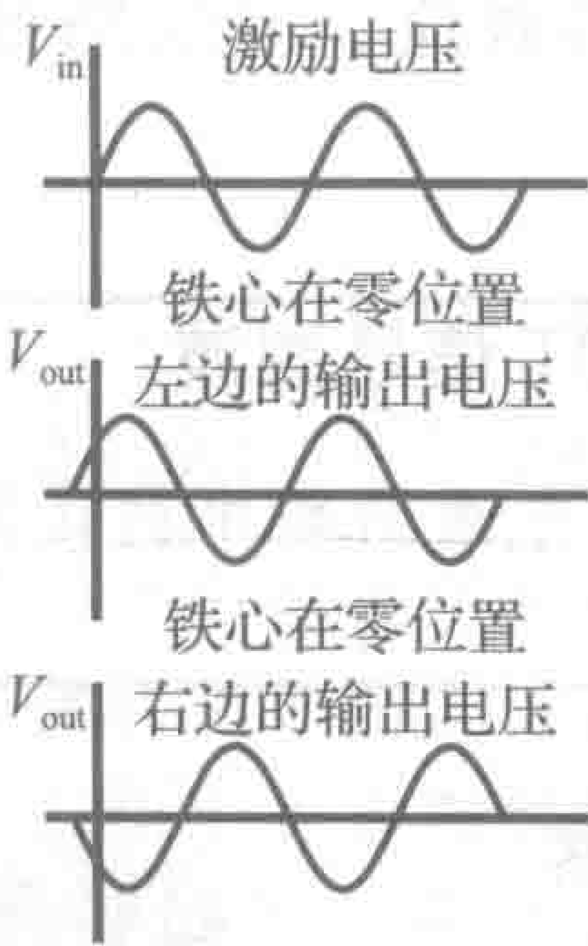


图 9-7　线性可变差动变压器(LVDT)

图 9-8　LVDT 的线性范围

为了确定铁心位移的方向，二次线圈可以连接到解调电路中，如图 9-9 所示。该电路中的二极管桥根据铁心位置位于零位的哪一边产生正或负整流正弦波(见课堂讨论项目 9.2)。

课堂讨论项目 9.2　**LVDT 解调**

分析图 9-9 所示的解调电路中流过二极管的电流，解释不同铁心位置(比如零、零左边和零右边)对应输出电压的变化过程。假设二极管为理想二极管。此外，解释当铁心在零或中心位置时输出为什么是零。

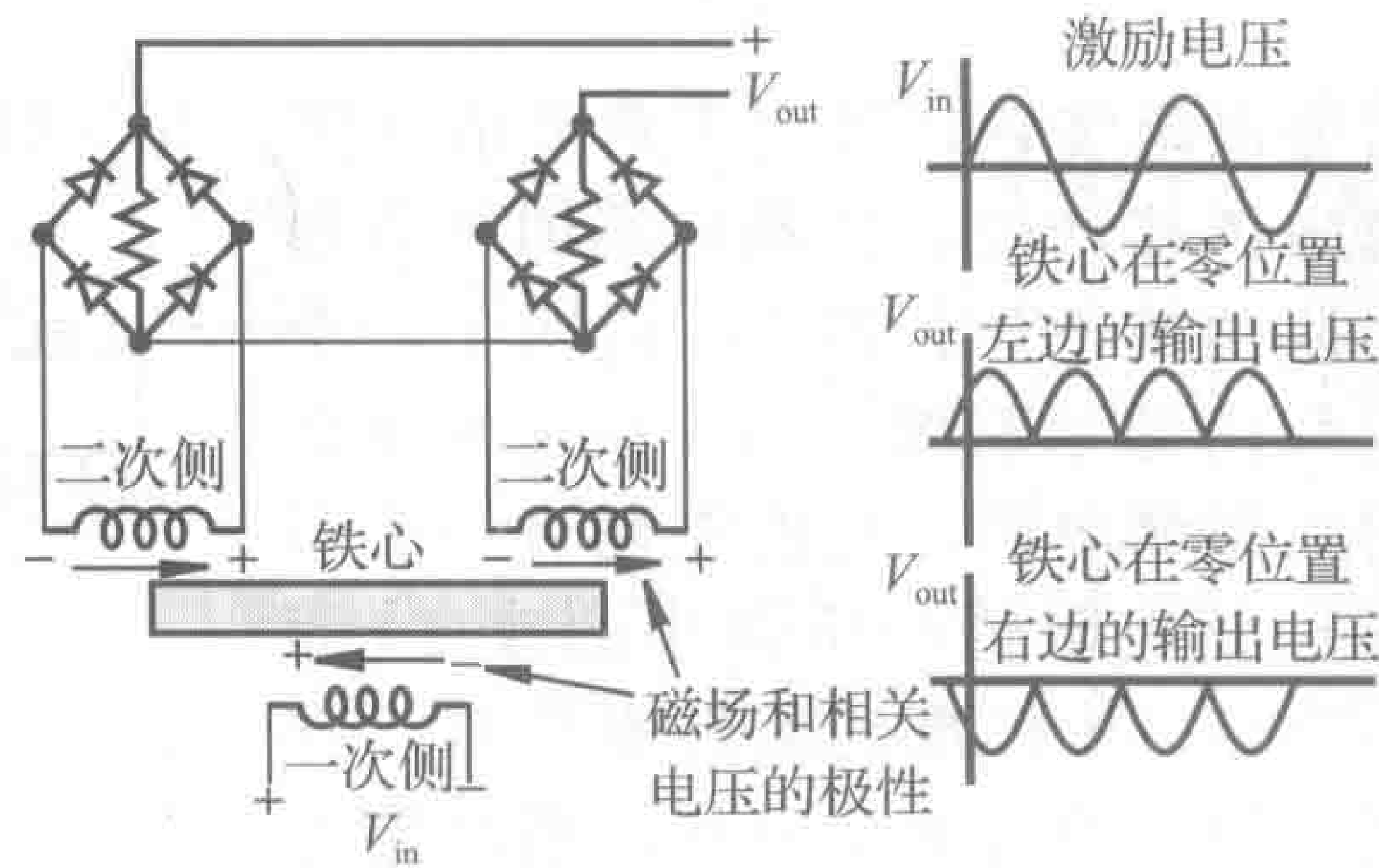


图 9-9　LVDT 解调电路

如图 9-10 所示，低通滤波器通常用来将整流输出转换成跟踪铁心位置的平滑信号，这个低通滤波器的截止频率必须仔细选择，以过滤掉整流波的高频分量，但不能滤除与铁心运动相关的频率分量。激励频率通常至少选择为铁心运动的最大期望频率的 10 倍，以精确检测时变位移。

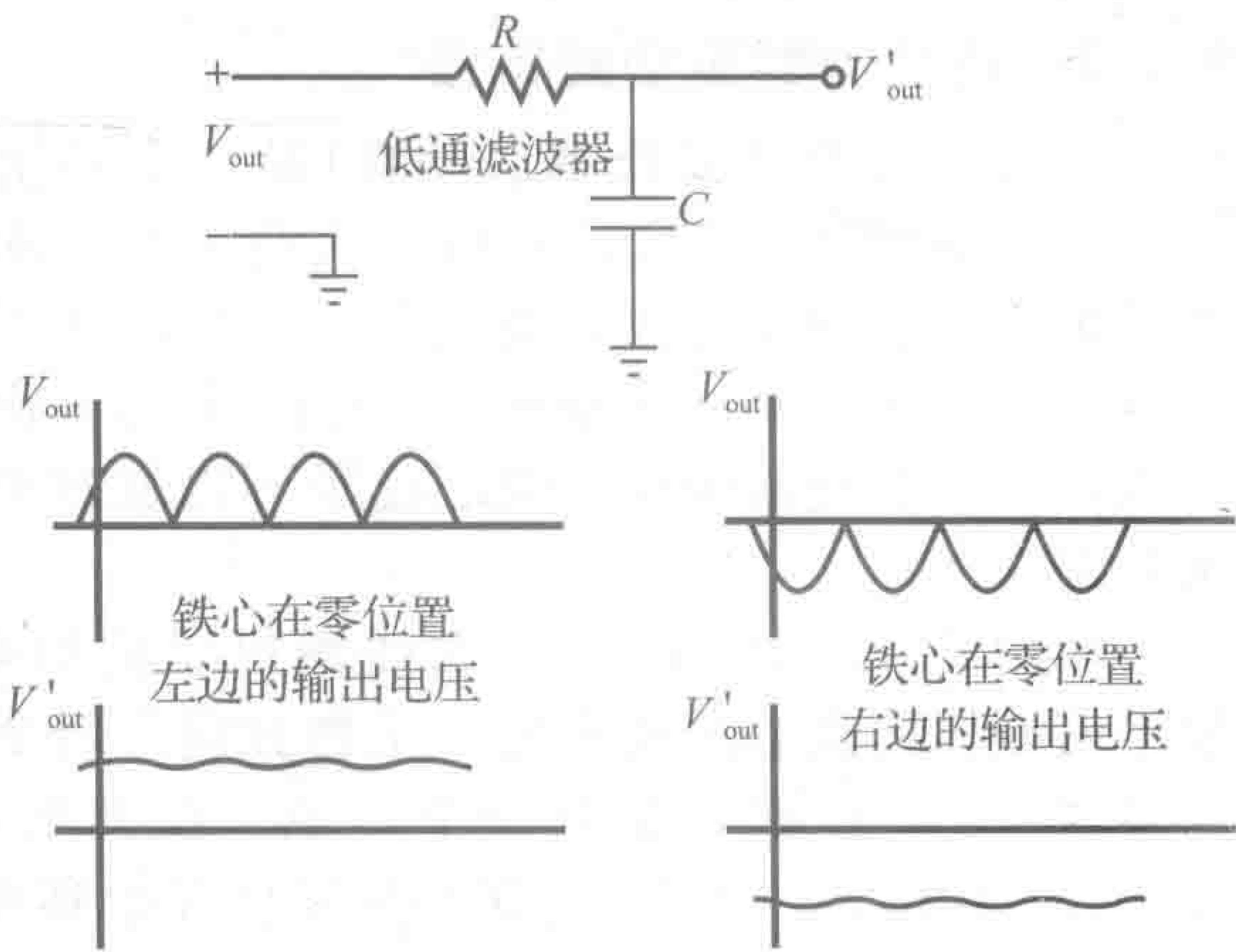


图 9-10　LVDT 输出滤波器

如图 9-11 所示，商用 LVDT 通常是圆柱状的，可以有不同的直径、长度和触头，通常其内部包括提供与位移成正比的直流电压电路。

LVDT 的优点是在整个线性范围内精度高且模拟输出不需要放大。此外，相比其他位置变送器(例如，电位器、编码器和半导体器件)，它对温度变化不敏感。LVDT 的缺点包括有限的运动和频率响应范围。整体频率响应受到与铁心质量相关的惯性效应、主激励频率的选择和滤波器截止频率的限制。

课堂讨论项目 9.3　　LVDT 信号滤波

给定一个时变铁心位移的频谱，这对主激励频率的选择有什么影响？应该如何设计低通滤波器以产生一个最合适的位移输出？

旋转变压器是一种模拟旋转位置传感器，其操作非常像 LVDT。它由一个具有一次绕组的旋转轴(转子)和带有两个偏移 90°的二次绕组的固定壳体(定子)组成。当用交流信号激发一次侧时，在二次线圈中产生交流电压，它与轴角的正弦和余弦成正比。因此，旋转变压器常用于有关位置的三角函数中。

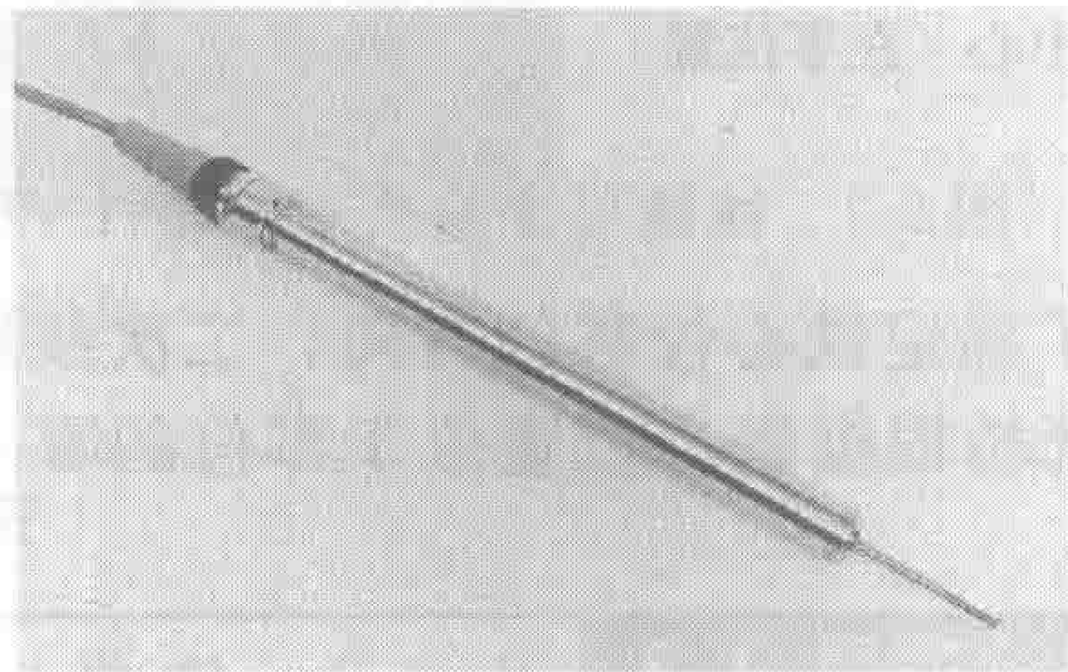


图 9-11　商用 LVDT(由森索泰克公司提供)

两种基于磁性原理直接测量线性位移的线性位置传感器是**音圈**和**磁致伸缩**位置传感器。视频演示 9.5 和 9.6 显示了两种传感器是如何工作的。

9.2.4　数字光电编码器

数字光电编码器是一种将运动转换成脉冲序列的传感器。通过计数单个脉冲或解码多脉冲位，脉冲可以转换为相对或绝对位置。编码器具有线性和旋转两种结构，但旋转是最常见的类型。旋转编码器有两种基本形式：一种是绝对式编码器，其中唯一的一个数字对应轴的每个旋转位置；另一种是增量式编码器，它随轴旋转产生数字脉冲，允许测量轴的相对位移。如图 9-12 所示，大多数旋转编码器是由玻璃或塑料等材料的码盘组成。在每个码道的径向线中断光电发射检测器对之间的光束，产生数字脉冲。

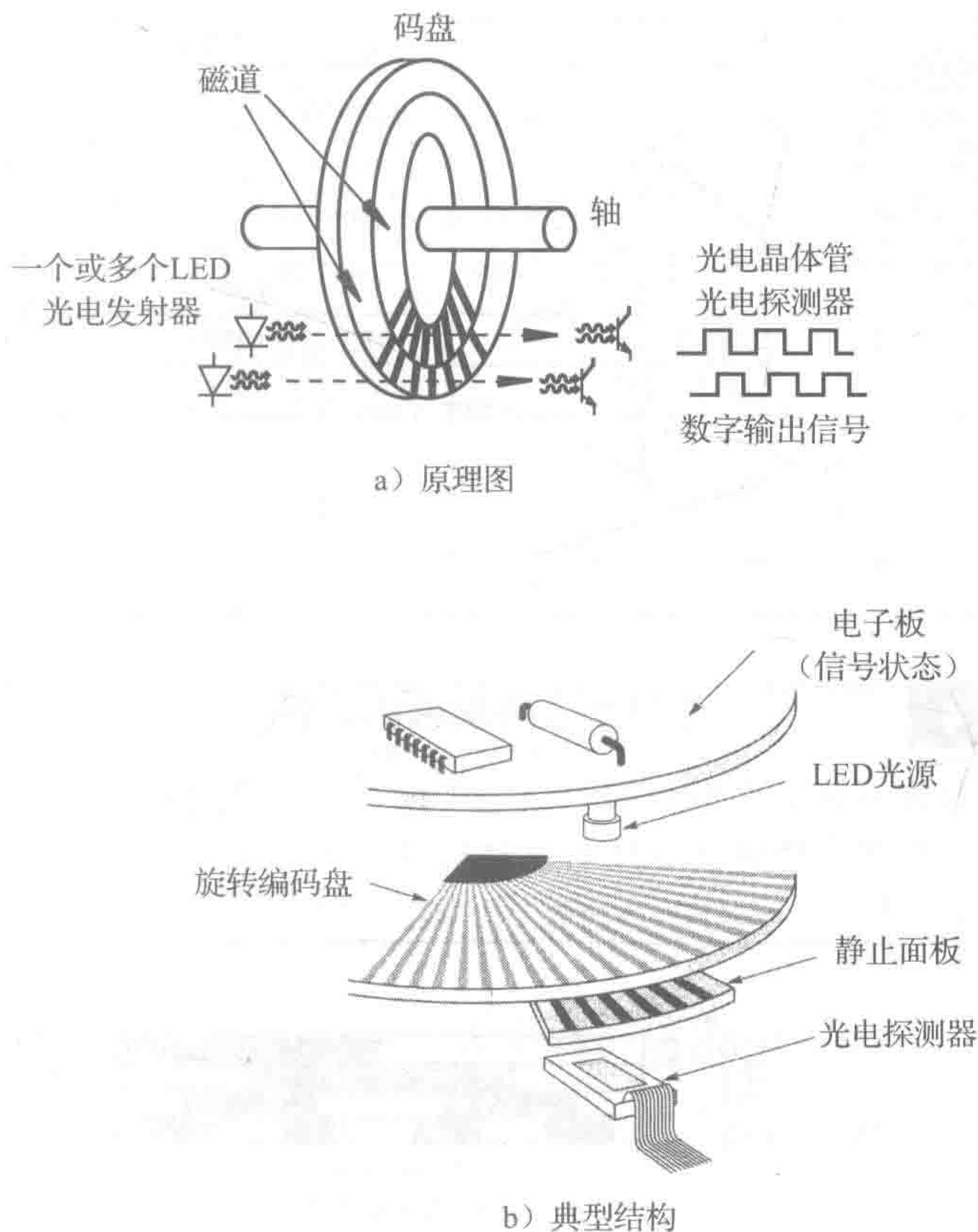


图 9-12　光电编码器的组件(资料来源：卢卡斯跳光机构有限公司)

视频演示 9.7 显示和描述了一个小的数字编码器的内部组件。在这个例子中，编码盘是由冲压金属薄片组成的。视频演示 9.8 和 9.9 描述编码器两个有趣的应用：计算机鼠标和工业机器人。观看视频演示 1.1 和 1.2 查看机器人如何工作和编码器怎样被纳入内部设计中。视频演示 1.5 显示了编码器的另一应用，但成本是其主要问题，因此需要定制设计。

绝对式编码器的光码盘设计用来产生一个数字以区分轴的 N 个不同位置。例如，具有 8 个轨道的编码器能够测量 256(2^8)个对应于 1.406°(360°/256)角分辨率的不同位置。在绝对编码器中最常用的数字编码类型是格雷码和自然二进制编码。为了说明绝对式编码器的作用，图 9-13 和图 9-14 分别给出了一个简单的四轨道模式编码器对应的格雷码和自然二进制编码盘的轨道模式，当码盘圆形轨迹随轴旋转时，光电探测器所检测到的线性图案和相关时序图即为图中所示。表 9-1 列出了两种编码方案的输出位代码。

格雷码的设计使得每次计数只有一个磁道(一位)改变状态。不同于二进制编码，它的多个磁道(位)可以在计数转换期间改变。这种效果可以在图 9-13、图 9-14 和表 9-1 的最后

两列中清楚地看到。对于格雷码，转换过程中的不确定性仅是一个计数。与二进制编码不同，它的不确定性可能是多个计数。

表 9-1　4 位格雷码和自然二进制编码

十进制编码	旋转范围(°)	自然二进制码($B_3B_2B_1B_0$)	格雷码($G_3G_2G_1G_0$)
0	0～22.5	0000	0000
1	22.5～45	0001	0001
2	45～67.5	0010	0011
3	67.5～90	0011	0010
4	90～112.5	0100	0110
5	112.5～135	0101	0111
6	135～157.5	0110	0101
7	157.5～180	0111	0100
8	180～202.5	1000	1100
9	202.5～225	1001	1101
10	225～247.5	1010	1111
11	247.5～270	1011	1110
12	270～292.5	1100	1010
13	292.5～315	1101	1011
14	315～337.5	1110	1001
15	337.5～360	1111	1000

课堂讨论项目 9.4　编码器二进制编码问题

对于一个 4 位格雷码绝对式编码器和一个 4 位自然二进制绝对式编码器，它们的最大计数不确定性是什么？在 4 位自然二进制绝对式编码器中发生的最大计数不确定性在十进制转换中表现的是什么？

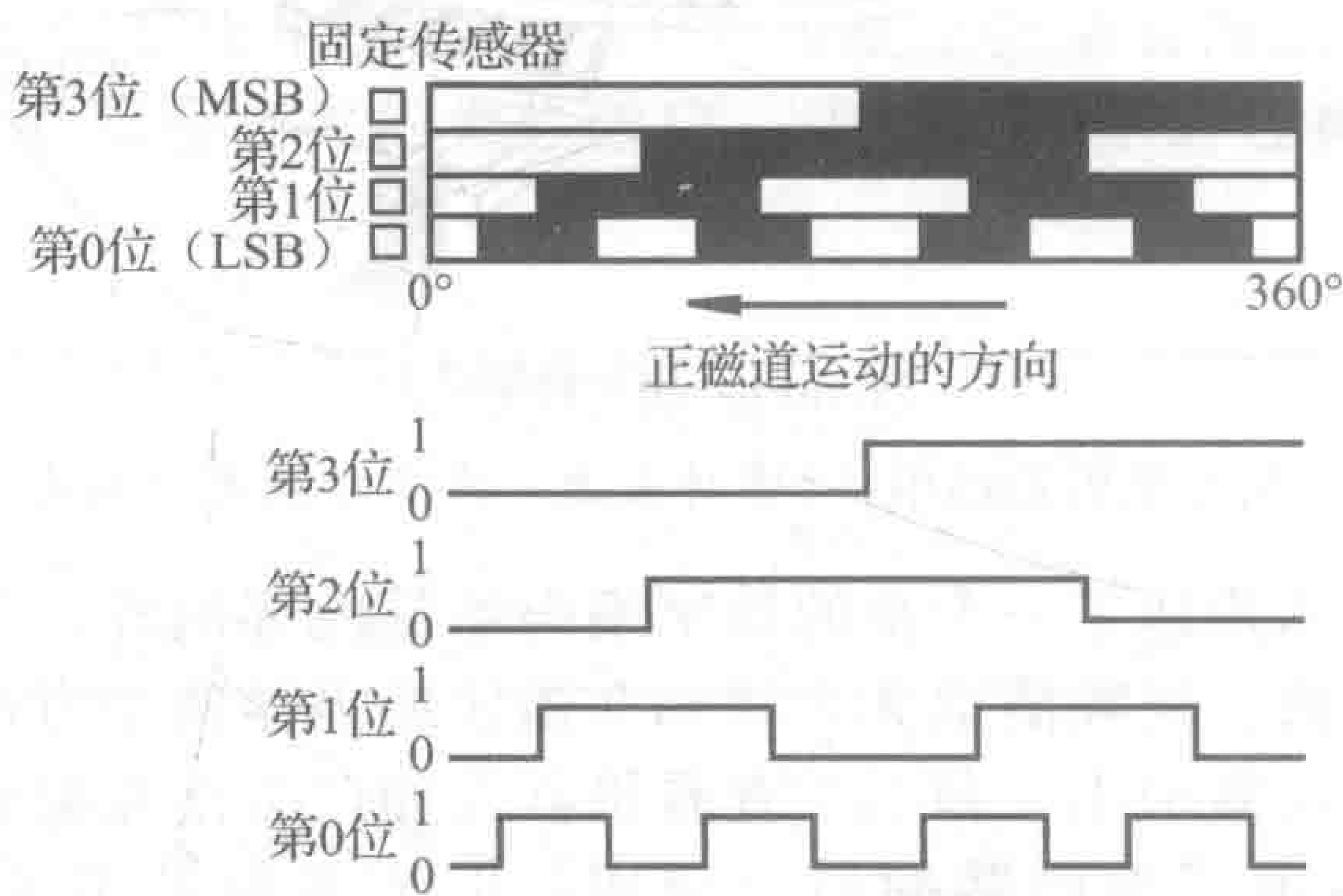


图 9-13　4 位格雷码绝对式编码盘轨迹模式

虽然格雷码提供的数据具有最小的不确定性，但是若直接连接到计算机和其他数字设备，自然二进制代码是首选，因此，需要一个将格雷码转换为二进制编码的电路。图 9-15 显示了一个利用异或(XOR)门执行该功能的简单电路。将二进制位(B_i)与格雷码位(G_i)联系起来的布尔表达式是：

$$B_3 = G_3$$
$$B_2 = B_3 \oplus C_2$$
$$B_1 = B_2 \oplus G_1$$
$$B_0 = B_1 \oplus G_0 \tag{9-1}$$

对于位数为 N 的格雷码到二进制码的转换(如先前的 $N=4$)，二进制和格雷码的最高有效位总是相同的($B_{N-1}=G_{N-1}$)，对于 $i=0\sim N-2$，二进制位是异或组合：$B_i=B_{i+1}\oplus G_i$。这种模式在上面 4 位的例子中可以很容易地看到[见式(9-1)]。

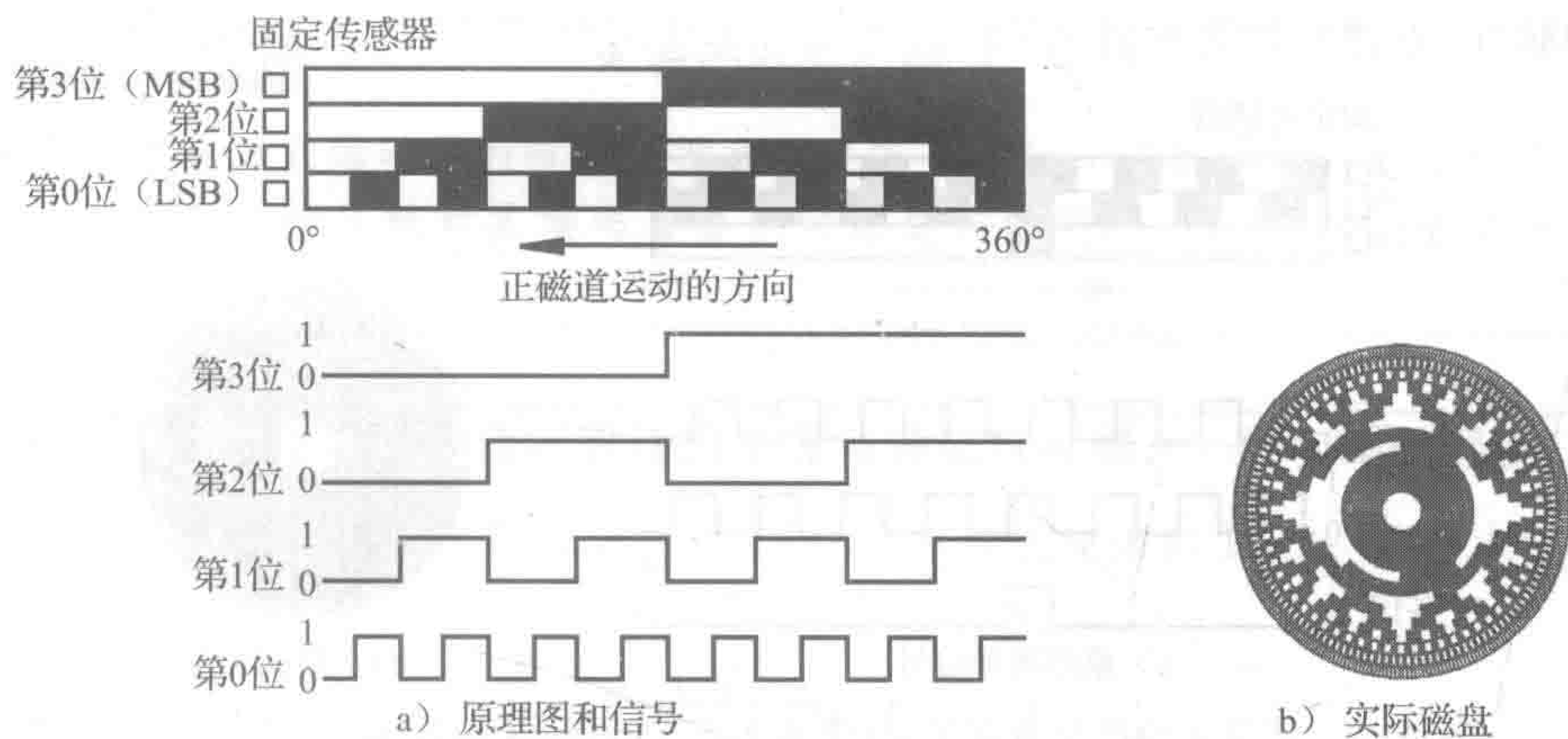


图 9-14　4 位自然二进制绝对式编码盘轨迹模式(资料来源：Parker Compumotor Division)

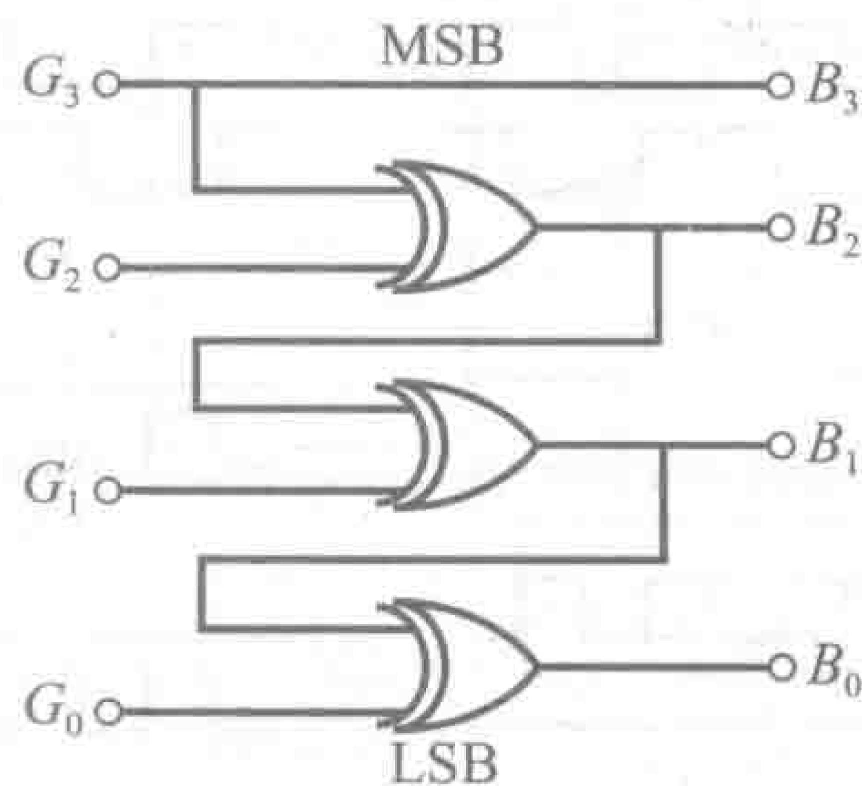


图 9-15　格雷码到二进制码的转换

课堂讨论项目 9.5　格雷码与二进制码的转换

检查式(9-1)的有效性，将它们应用到表 9-1 中的最后两列中。

增量式编码器，有时称为**相对编码器**，在设计上比绝对式编码器更简单。它由两个轨道以及两个指定输出 A 和 B 的传感器组成。随着轴旋转，一个与轴速成比例的频率在 A 和 B 上产生脉冲串，信号的超前/滞后相位关系产生下面所描述的旋转方向。编码盘模式和输出信号 A 和 B 如图 9-16 所示。通过计算脉冲数和已知编码盘的分辨率，即可测量角运动。A 和 B 是 1/4 周期反相，称为**正交信号**。通常会有第三路输出，称为索引(零位)信号，每转产生一个脉冲，它用于计数整转，也用于定义参考位或零位置。

图 9-16a 说明了使用 A、B 两个磁道的结构，但更常见的结构是仅用单个磁道(见图 9-16b 和视频演示 9.7)，A 和 B 传感器偏移 1/4 轨道周期，产生的信号模式相同。单磁道编码盘的制造更简单、更便宜。

A 和 B 的正交信号可以解码产生角位移，转动方向如图 9-17 所示。图中两个脉冲(CW 和 CCW)分别对应顺时针(CW)旋转和逆时针旋转(CCW)。使用顺序逻辑电路 A 和 B 的解码转换可以提供 3 种不同的分辨率：1X、2X 和 4X。1X 的分辨率在信号 A 或 B 的每一个下降沿提供一个输出转换，产生一个正交周期的单脉冲。2X 的分辨率在信号 A 或 B 的每一个下降沿或上升沿提供一个输出转换，产生两倍的输出脉冲数。对于 4X 的分辨率，它可以在信号 A 或 B 的每一个下降和上升沿产生一个输出脉冲，产生四倍的输出脉

冲数。旋转方向根据第二个信号边沿跳变时第一个信号的电平状态来确定。例如，在1X模式下，$A=\downarrow$ 时 $B=1$ 意味着顺时针旋转，$B=\downarrow$ 时 $A=1$ 的意味着逆时针旋转。如果只用一个信号代替 A 和 B，则旋转方向将不能确定。此外，在单信号边缘转换的轴抖动会产生错误的脉冲(见课堂讨论项目9.6)。

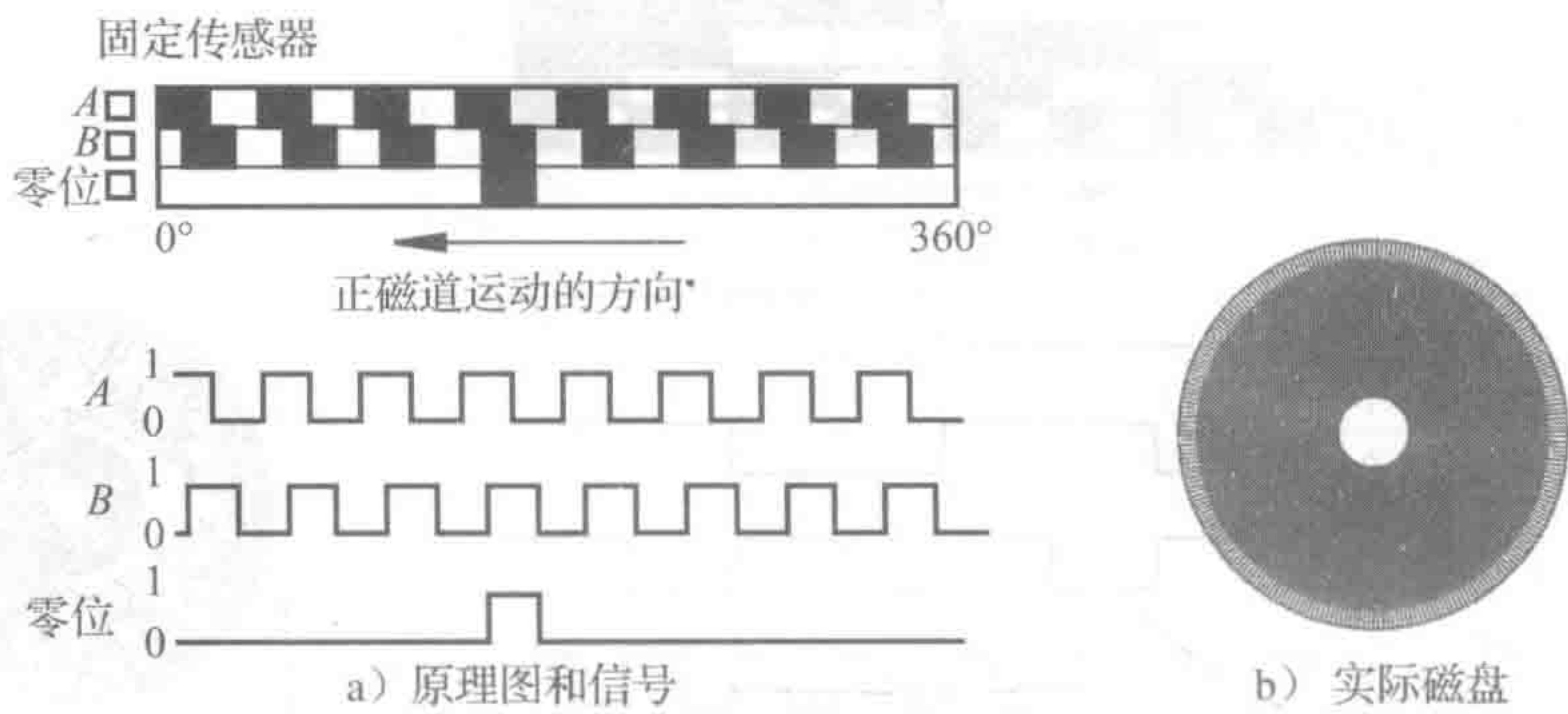


图 9-16　增量式编码盘轨迹模式(资料来源：Parker Compumotor Division)

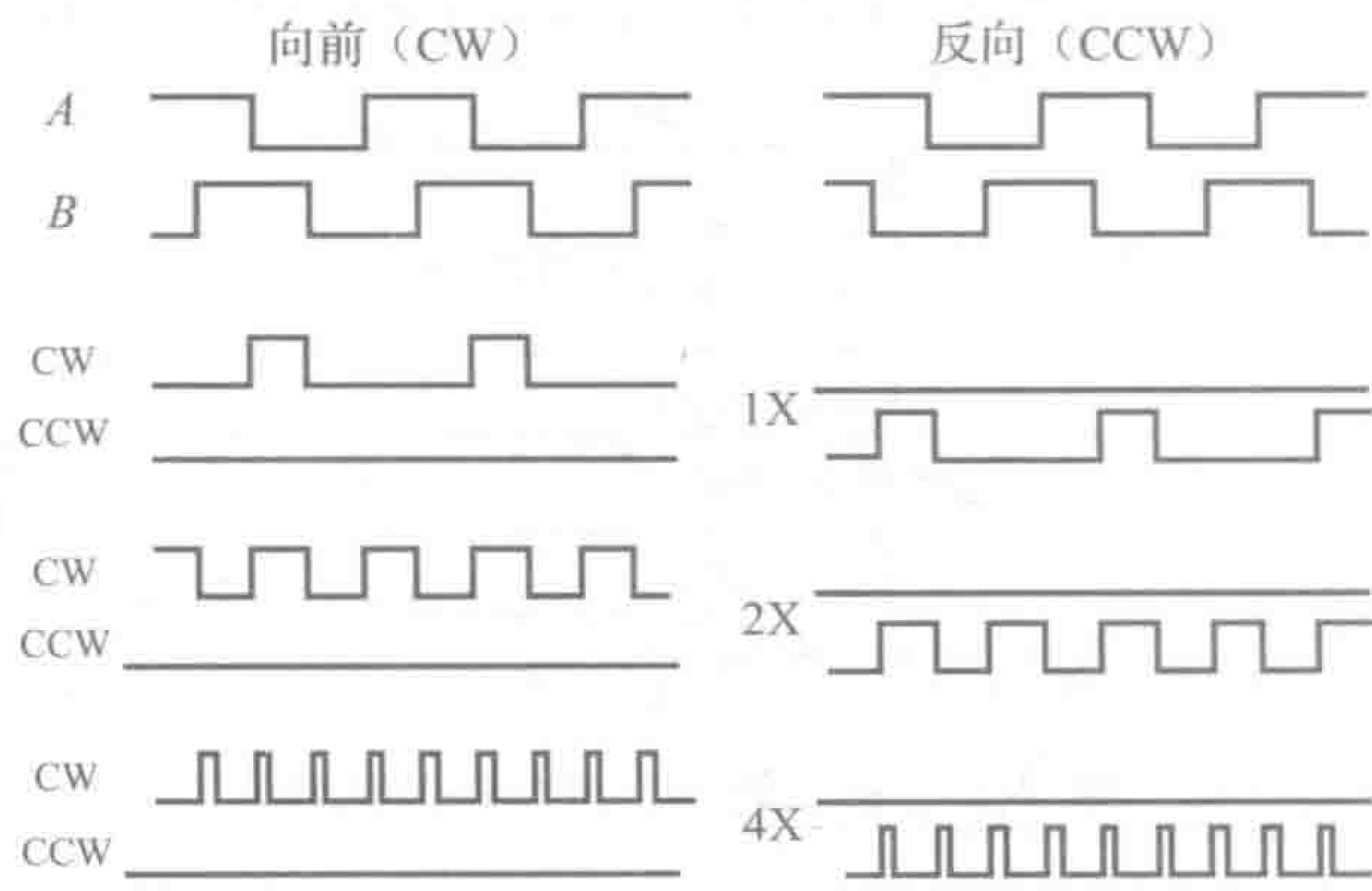


图 9-17　正交方向传感和分辨率增强

课堂讨论项目 9.6　具有抖动的编码器 1X 电路

连接到1X正交解码电路的一个增量式编码器具有相当于一个正交脉冲宽度的小旋转振动。在这个振动期间，在CW和CCW线上你可观察到许多脉冲，但可逆计数器的输出没有净变化。解释为什么会这样。

图9-18所示为一个1X分辨率的电路，对正交信号的下降沿计数脉冲。D触发器用于解码旋转方向，其输出用于控制可逆计数器的计数方向。除了检测1X分辨率的边缘，也可设计电路去检测其他边缘，实现两倍(2X)和四倍(4X)的基础分辨率(1X)。这些正交解码器电路可以由分立元器件构成，也可由集成电路实现(如惠普公司的HCTL-2016)。正交解码也可以通过微控制器上运行的软件实现(见问题9.11)。

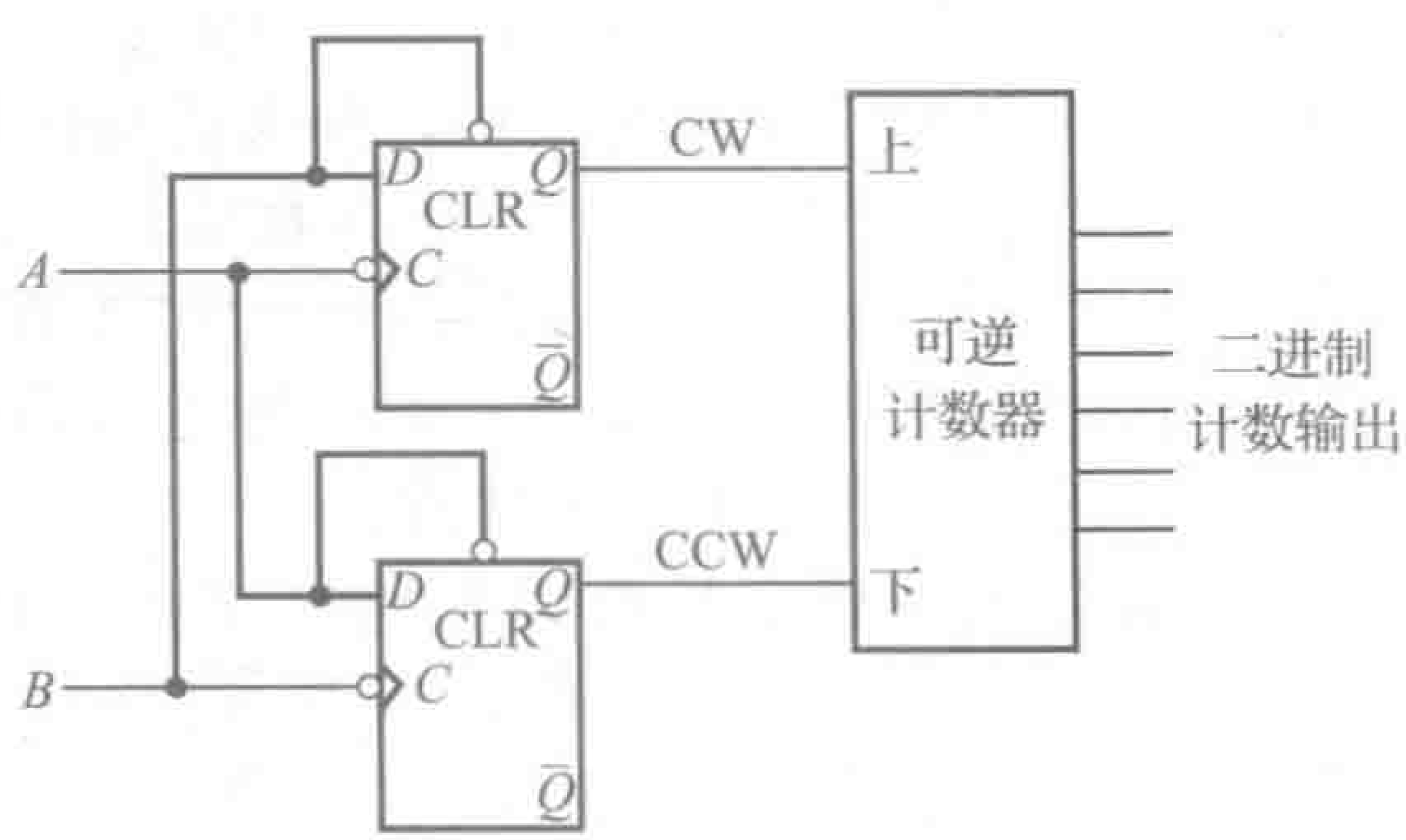


图 9-18　1X 正交解码器电路

相比绝对式编码器，增量式编码器能以较低的成本提供更高的分辨率，但它们只测量相对运动，不直接提供绝对位置。然而，

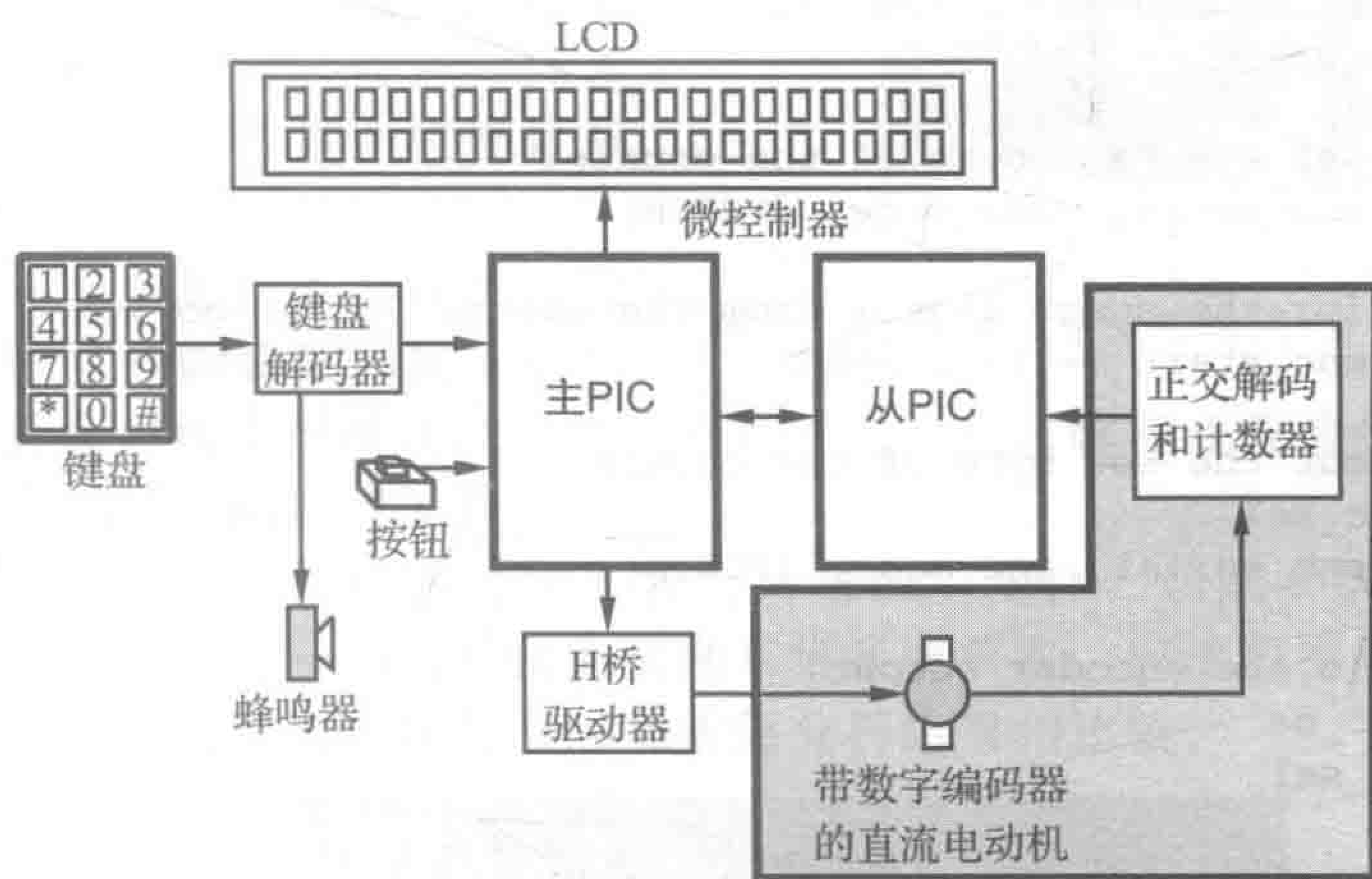
增量式编码器可与限位开关一起使用，根据限位开关确定的参考位置来获取绝对位置。当无法建立参考点或不期望外加参考点时，应选用绝对式编码器。

课堂讨论项目 9.7 带编码器的机械臂

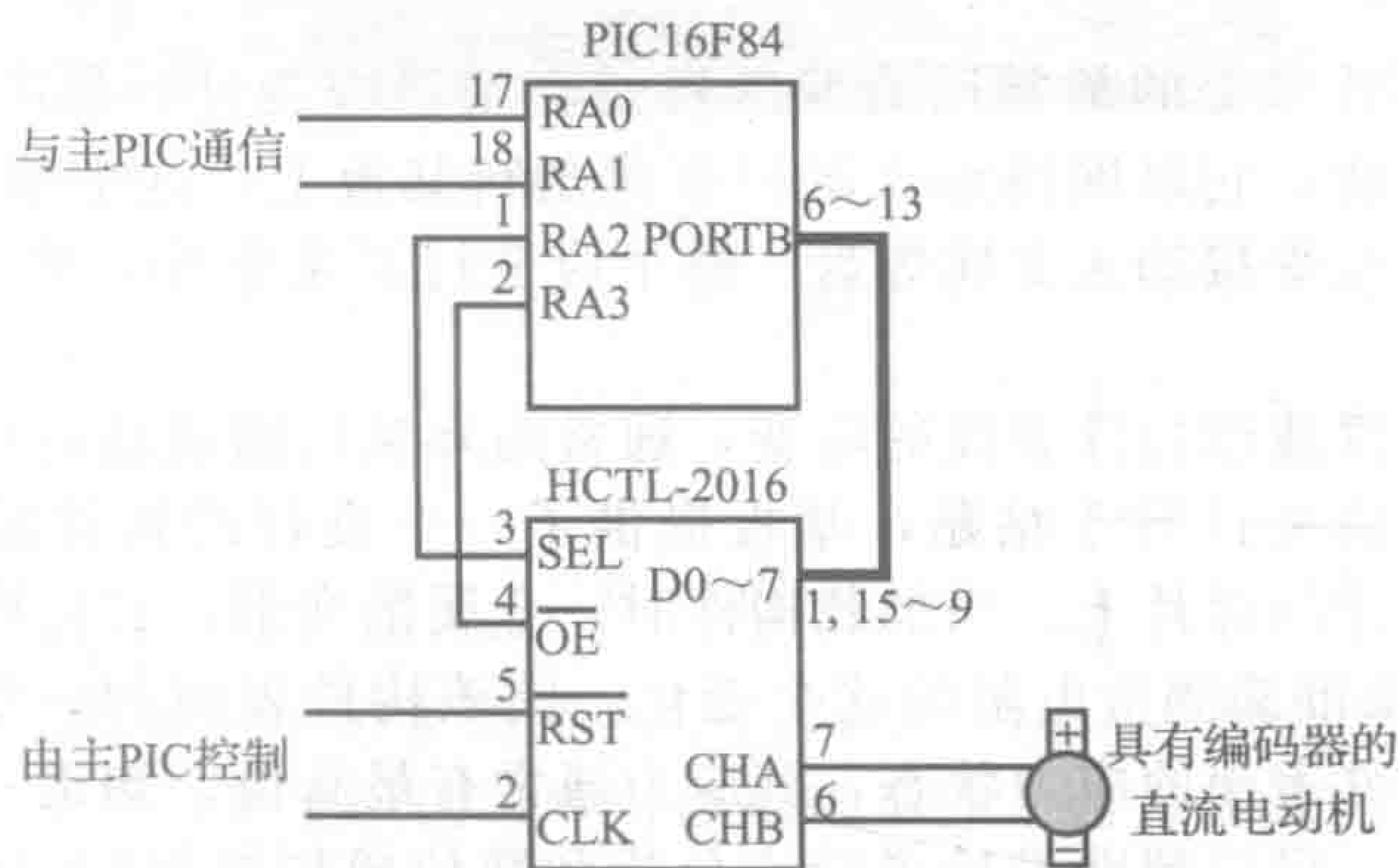
当一个具有绝对式编码器的机械手臂在其关节上电时，机器人确切地知道它的链接相对于参考点的位置。如果绝对式编码器替换为增量式编码器，这是否依然准确？如果不能，机器人该如何为其机械臂确定零位参考点？

渐进设计实例 C.4 直流电动机位置与速度控制器——数字编码器接口

下图显示了渐进设计示例 C 的功能图(见 1.3 节和视频演示 1.8)，其中本节描述的部分突出显示。



下图显示了从 PIC 读取数字编码器位置所需的元器件及其连接关系。商用正交解码器/计数器接口 IC——HCTL-2016 是设计中的主要组成部分。有关此器件的详细信息可在网络链接 9.3 的数据手册中找到。HCTL-2016 需要时钟信号来操作，在该设计中，其时钟由主 PIC 上的时钟输出信号来提供。主 PIC 在适当的时刻(通过$\overline{\text{RST}}$线)重置编码器的计数器以定义零位置。数字编码器的正交信号(通道 A 和 B)连接到 HCTL-2016。HCTL-2016 包含一个 16 位计数器，与从 PIC 的接口通过 8 位 PORTB 实现，每次只能读取一个字节的数据。粗线是在接线图上表示多条导线(该例中为 8 根导线)，它连接 PIC 上的 PORTB 到 HCTL-2016 的 D0～D7。SEL 引脚用来指示读取哪一个字节。$\overline{\text{OE}}$引脚用于在 PIC 读取 HCTL-2016 之前锁存编码器值。



下面显示的是从 PIC 中的代码，它的作用是监视数字编码器的位置，并根据要求将数据传回主 PIC。PIC 的完整代码存在于渐进设计实例 C.3 中，此处，也给出 PIC 之间串行通信的过程。

```
' Define I/O pin names and constants

enc_start Var PORTA.0       ' signal line used to start encoder data transmission
enc_serial Var PORTA.1      ' serial line used to transmit encoder data
enc_sel Var PORTA.2         ' encoder data byte select (0:high 1:low)
enc_oe Var PORTA.3          ' encoder output enable latch signal (active low)
enc_mode Con 2              ' 9600 baud mode for serial communication

' Main loop
start:
     ' Wait for the start signal from the master PIC to go high
     While (enc_start == 0) : Wend

     ' Enable the encoder output (latch the counter values)
     Low enc_oe

     ' Send out the high byte of the counter
     SEROUT enc_serial, enc_mode, [PORTB]

     ' Wait for the start signal from the master PIC to go low
     While (enc_start == 1) : Wend

     ' Send out the low byte of the counter
     High enc_sel
     SEROUT enc_serial, enc_mode, [PORTB]

     ' Disable the encoder output
     High enc_oe
     Low enc_sel

goto start    ' wait for next request
```

9.3 应力与应变测量

机械部件中的应力测量对评估机械部件是否满足安全负载水平是非常重要的。应力和应变测量也可以用来间接测量其他物理量，比如力(通过测量弯曲单元的应变)、气压(通过测量柔性膜片中的张力)和温度(通过测量材料的热膨胀)。测量应变最常用的变送器是电阻应变计。正如我们看到的，应力值可以用固体力学原理从应变测量中确定。

附录 C 中给出了基本的应力应变关系和平面应力分析技术，供读者参考。

9.3.1 电阻应变计

用于测量机械部件应变的最常用的变送器是金属箔应变计，如图 9-19 所示。它由金属箔(通常为康铜)组成，它以网格形式沉积在薄塑料基板上，这个基板通常是聚酰亚胺。箔线两端带有用于导线焊接的大金属焊盘。整个应变计通常很小，典型的应变计只有 5～15mm 长。

为了测量机器部件或结构件表面的应变，通常用环氧树脂或黏合剂将应变计直接粘在构件上。为了使箔式应变计易于粘贴，基板提供了一个良好的粘接面并且与金属箔电绝缘。引线焊接到应变计的焊片上。当加载构件时，金属箔变形，其电阻以可预测的方式变化(见图 9-19b)。如果准确测量电阻的这个变化，则该构件表面的应变即可测定。应变测量使我们能够确定构件表面的应力状态，其应力通常有最高值。知道一个零件的关键部位在负载作用下的应力，可以帮助设计者验证分析和数值模拟结果(如从有限元分析中获得

的结果)，验证应力水平低于材料的安全限值(如屈服强度以下)。需要注意的是，由于应变计的大小是有限的，所以测量实际上反映了一个小面积上应变的平均值。因此，当应力梯度大(如有集中应力)时测量结果会较差。

实验应力分析(例如，应变计)和解析或数值应力分析(例如，有限元分析)对机械零件的可靠性设计都很重要。这两种方法是互补的，而不是相互替代的。有限元分析涉及许多假设，比如材料属性、施加负载和边界条件。当加工和加载它时，可能不能准确地模拟实际零件。由于粘贴不标准和表面方向未对准以及未补偿温度的影响，应变计测量也有误差。而且，因为零件空间和可达性等限制因素，应变计只能检测特定位置。

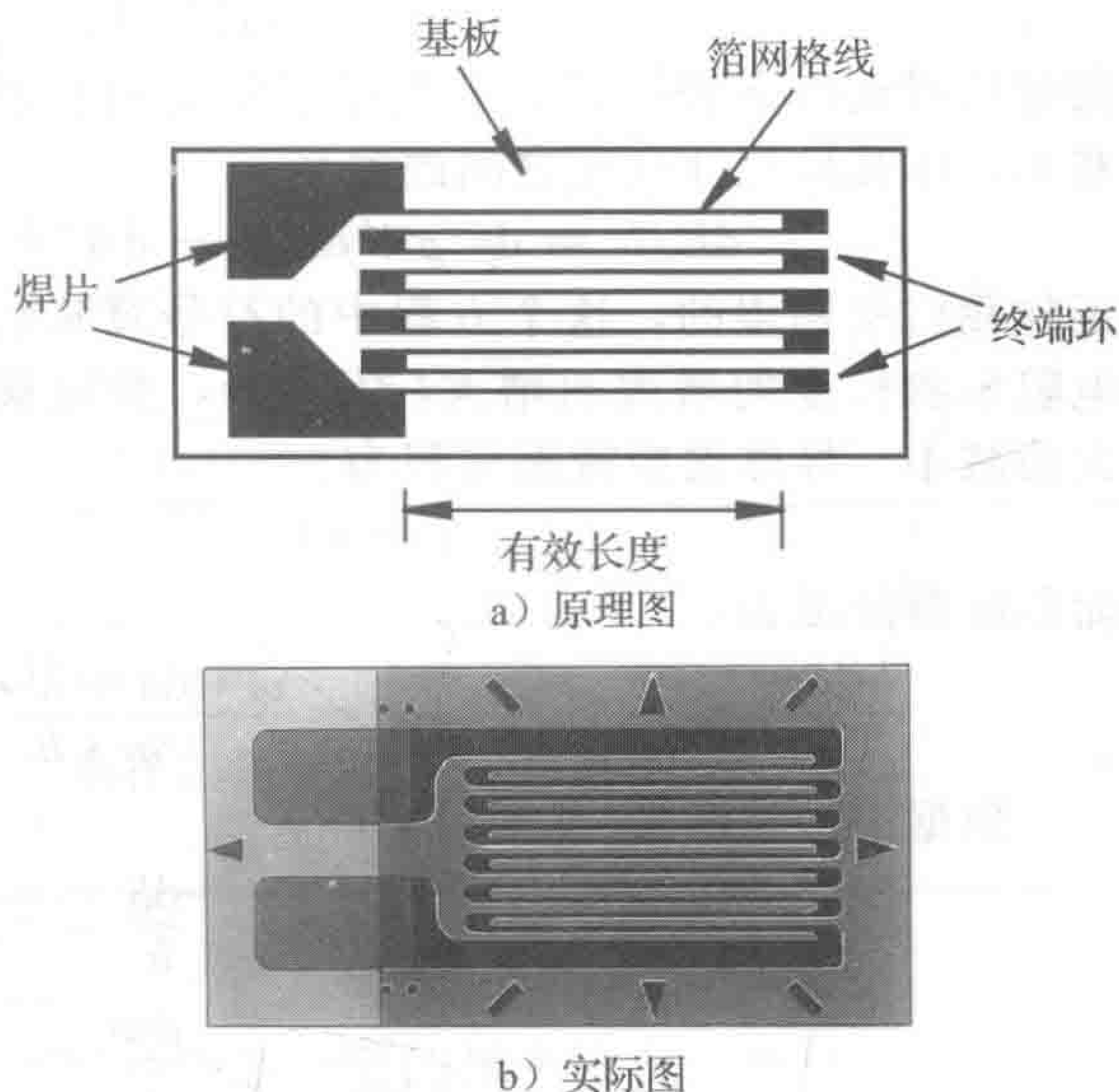


图 9-19 金属箔应变计结构(资料来源：测量集团)

应变计可以很方便地获取部件的应力状态，但由于机械零件的装配和复杂的负载和边界条件，其应力状态很难通过有限元分析建模，通过解析或数值的方法也很难预测或精确描述其状态和相关的影响因素。

实验应力测试通常需要在机械部件上安装大量的应变计，如图 9-20 所示，这是在加载前完成的。应变值常通过一个自动化的数据采集系统获取。应变数据可以转化为不同加载条件下的部件应力，与解析或数值有限元数值分析结果相比较。

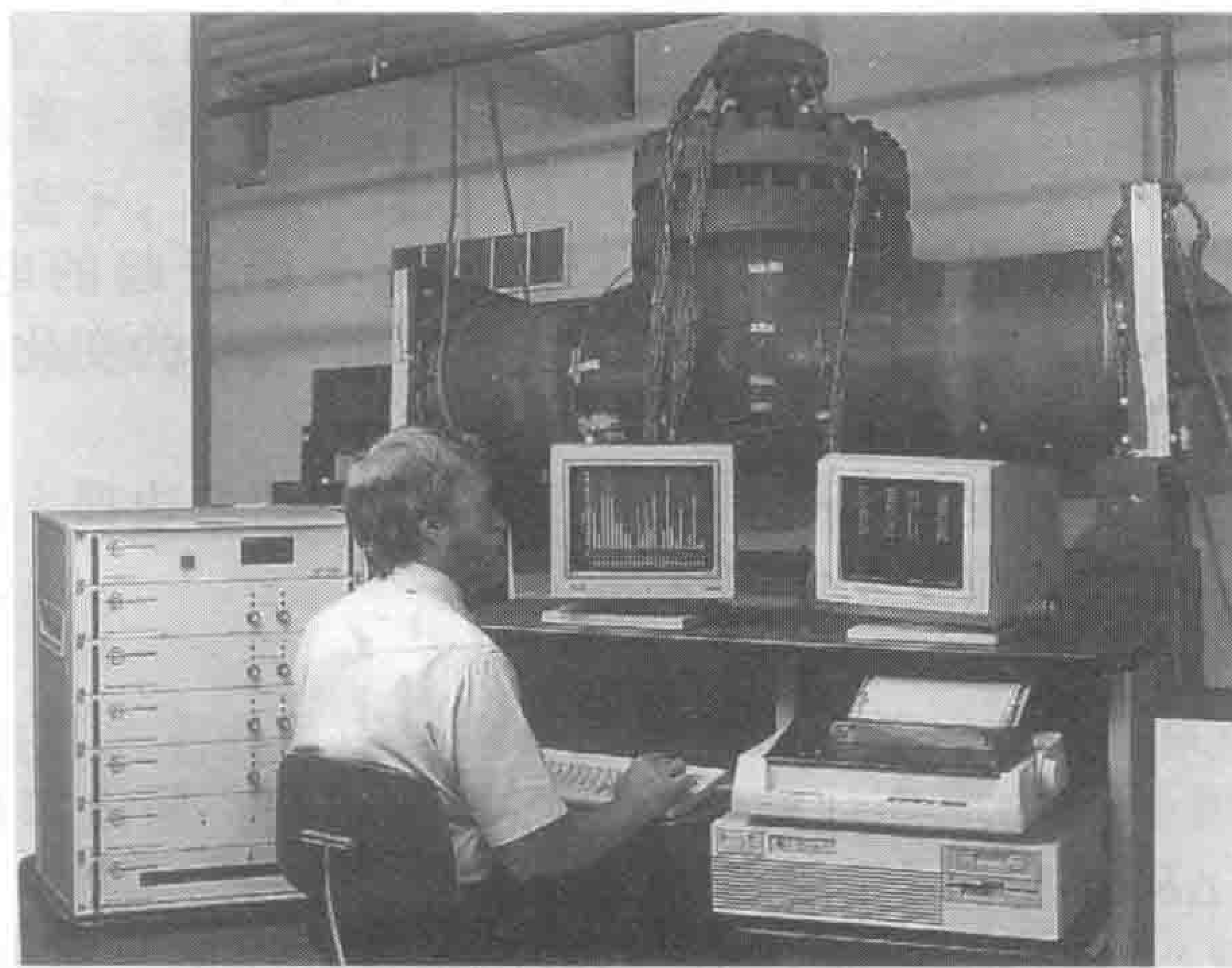


图 9-20 应变计应用(资料来源：Measurements Group 公司)

为了了解应变计是如何测量应变力的，首先看看变形时金属箔电阻如何变化。应变计活动部分中的金属箔网格线(见图 9-19a)可以由单个矩形导体近似模拟，如图 9-21 所示，其总电阻为：

$$R=\frac{\rho L}{A} \tag{9-2}$$

其中，ρ 是金属箔的电阻率；L 是金属箔网格线的总长度；A 是金属箔网格线的截面积。应变计的终端环和焊片对测量电阻的影响可以忽略不计，因为其截面积通常远远大于箔线的截面积。

为了观察变形下的电阻变化，需要对式(9-2)取微分。先对式(9-2)两边取自然对数：

$$\ln R = \ln\rho + \ln L - \ln A \tag{9-3}$$

微分后得到以下表达式，它给出了给定材料属性的电阻变化和半导体几何尺寸变化之间的关系：

$$dR/R = d\rho/\rho + dL/L - dA/A \tag{9-4}$$

正如我们所期望的，这个方程中的符号意味着导体的电阻随电阻率和长度的增大而增大($dR>0$)，并随横截面面积的增大而减小。导体的横截面面积为：

$$A = wh \tag{9-5}$$

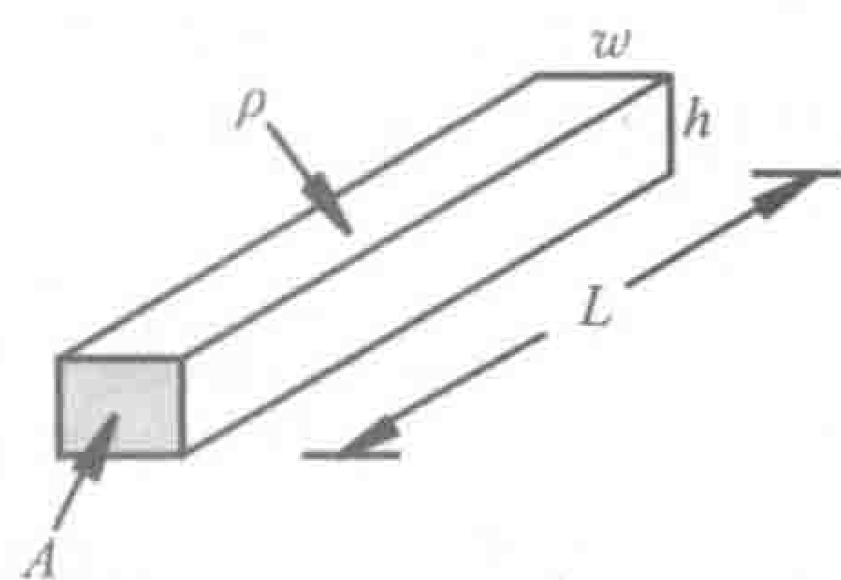


图 9-21 矩形导体

面积的微分项为：

$$\frac{dA}{A} = \frac{w \cdot dh + h \cdot dw}{w \cdot h} = \frac{dh}{h} + \frac{dw}{w} \tag{9-6}$$

根据泊松比定义(见附录 C)：

$$\frac{dh}{h} = -\nu\frac{dL}{L} \tag{9-7}$$

$$\frac{dw}{w} = -\nu\frac{dL}{L} \tag{9-8}$$

因此

$$\frac{dA}{A} = -2\nu\frac{dL}{L} = -2\nu\varepsilon_{axial} \tag{9-9}$$

其中，ε_{axial}是导体的轴向应变(见附录 C)。当导体拉长($\varepsilon_{axial}>0$)时，横截面面积会减小($dA/A<0$)，这会引起阻抗的增加。

利用式(9-9)和式(9-4)可以写为：

$$dR/R = \varepsilon_{axial}(1+2\nu) + d\rho/\rho \tag{9-10}$$

除以 ε_{axial}得

$$\frac{dR/R}{\varepsilon_{axial}} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_{axial}} \tag{9-11}$$

右边的前两项 1 和 2ν，代表由于长度增加和面积减少而引起的电阻变化。最后一项$(d\rho/\rho)/(\varepsilon_{axial})$表示材料中的**压阻效应**，即材料的电阻率随应变的变化。三项在典型金属箔应变计的工作范围内都是近似不变的。

应变计产品通常用恒定的**应变因子 F** 来表示式(9-11)的右边项。这个因子代表了应变计的材料特性，它与应变计的应变变化有关：

$$F = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_{axial}} \tag{9-12}$$

当已知电阻 R 和应变因子 F 的应变计粘贴到被测部件表面，部件加载后，即可以简单地通过测量电阻的变化(ΔR)确定应变计的应变 ε_{axial}：

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\Delta R/R}{F} \tag{9-13}$$

该应变是在加载部件表面沿应变计长度方向(轴向)的应变。

对于金属箔应变计，应变因子 F 通常接近于 2，应变电阻 R 接近 120Ω。应变计供应商还提供了应变计的**横向灵敏度**，它是由于横向应变引起的终端环和网格线电阻变化的量度。金属箔应变计的横向灵敏度通常接近 1%。这个数字表明了应变计对横向应变的敏感性，即垂直于应变计测量轴的那些应变。当轴向施加 $50\mu\varepsilon$(50×10^{-6}，称为 50 微应变)、横向施加 $100\mu\varepsilon$ 时，具有 1%横向灵敏度的应变计的检测值将为 $51\mu\varepsilon$($50\mu\varepsilon+1\%\times100\mu\varepsilon$)，而不是 $50\mu\varepsilon$。

例 9.1 应变计的电阻变化

如果使用一个应变因子为 2.0、应变电阻为 120Ω 的应变计测量一个 100με 的应变，应变计的电阻从空载状态到加载状态变化多少？

由式(9-12)可知

$$\Delta R = R \cdot F \cdot \varepsilon$$

因此电阻变化为

$$\Delta R = (120\Omega) \times (2.0) \times (0.000\,100) = 0.024\Omega$$

课堂讨论项目 9.8 应变计的压阻效应

对于一个应变因子为 2.0 的典型金属箔应变计，相比面积和长度变化的影响，压阻效应的影响有多大？

9.3.2 采用惠斯顿电桥测量电阻的变化

若想使用应变计精确测量应变，需要能够精确测量电阻的微小变化。测量小电阻变化最常见的电路是惠斯顿电桥，它由直流电压激励的四电阻网络组成。惠斯顿电桥比一个简单的分压器要好，因为它可以很容易地建立一个准确的零位平衡，允许温度补偿，并可以提供更好的灵敏度和精度。惠斯顿电桥有两种不同的工作模式：静态平衡模式与动态不平衡模式。对于**静态平衡模式**，如图 9-22 所示，R_3 和 R_2 是精密电阻，R_4 是具有精确刻度显示电阻值的精密电位器(可变电阻器)，R_1 是用于测量变化的应变计电阻。为了平衡电桥，调整可变电阻，直到节点 A 和 B 之间的电压为零。在平衡状态下，节点 A 和 B 处的电压必须相等，即

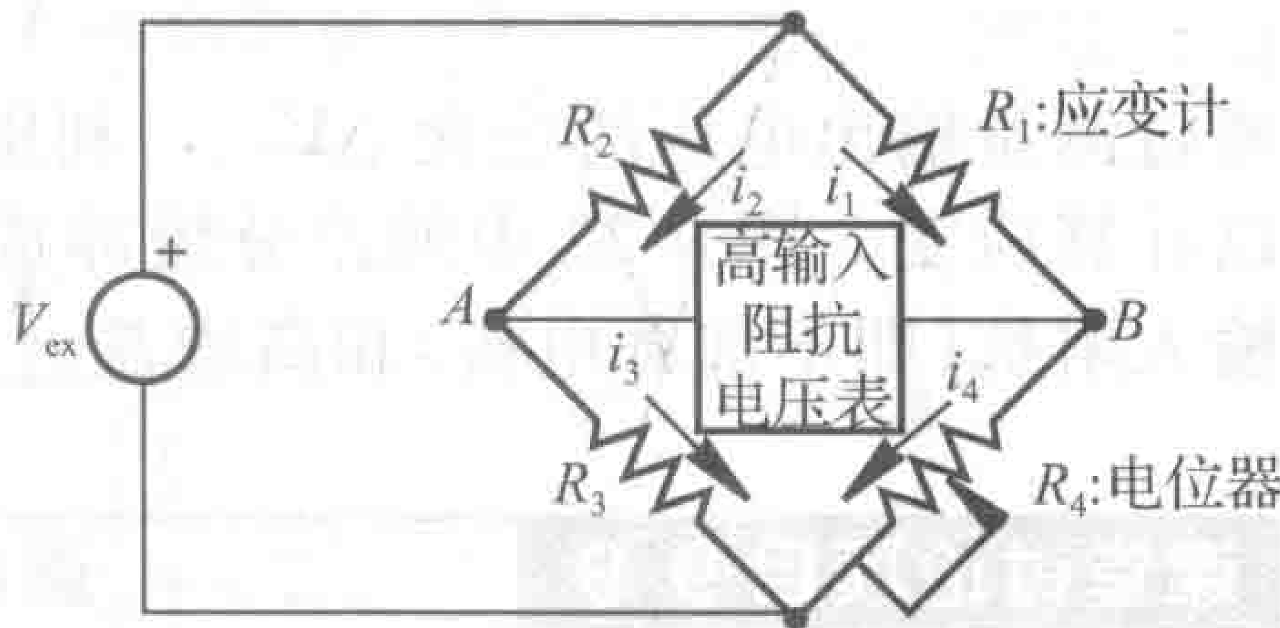


图 9-22 静态平衡电桥电路

$$i_1R_1 = i_2R_2 \tag{9-14}$$

而且，由于假定在 A 和 B 之间高输入阻抗的电压表中没有电流，因此

$$i_1 = i_4 = \frac{V_{ex}}{R_1 + R_4} \tag{9-15}$$

$$i_2 = i_3 = \frac{V_{ex}}{R_2 + R_3} \tag{9-16}$$

其中，V_{ex} 是应用于电桥的直流电压，称为**激励电压**。将这些表达式代入式(9-14)可得：

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \tag{9-17}$$

如果已知准确的 R_2 和 R_3，并从精密电位器的刻度上确定 R_4，可以精确地计算出未知电阻 R_1，即

$$R_1 = \frac{R_4R_2}{R_3} \tag{9-18}$$

请注意，此结果与激励电压 V_{ex} 无关(见课堂讨论项目 9.9)。

静态平衡模式可用于测量固定载荷下的电阻值，但通常平衡仅仅作为测量应变计电阻变化的初始步骤。在**动挠度操作**(见图 9-23)中，R_1 表示一个应变计，R_4 表示一个电位器，加载前首先平衡电桥，通过调整 R_4 直到没有输出电压。在时变载荷下产生的应变电阻 R_1 变化能够从输出电压的变化中确定。

输出电压可以用电阻中流过的电流表示为：

$$V_{out}=i_1R_1-i_2R_2=-i_1R_4+i_2R_3 \tag{9-19}$$

激励电压可表示为

$$V_{ex}=i_1(R_1+R_4)$$
$$=i_2(R_2+R_3) \tag{9-20}$$

根据式(9-20)的激励电压V_{ex}求解i_1和i_2，将这些参数代入到式(9-19)中得到：

$$V_{out}=V_{ex}\left(\frac{R_1}{R_1+R_4}-\frac{R_2}{R_2+R_3}\right) \tag{9-21}$$

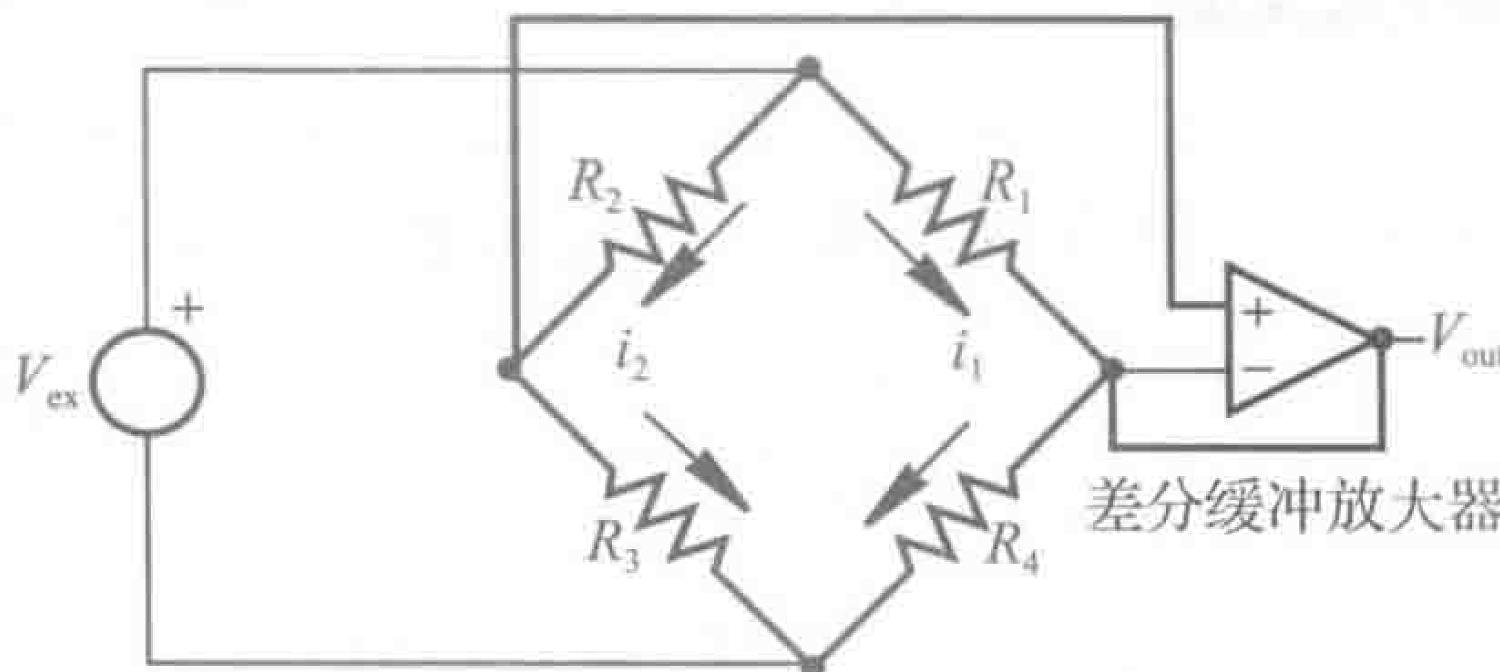


图 9-23　动态不平衡电桥电路

当电桥平衡时，V_{out}等于 0 且 R_1已知。当R_1值随应变计加载而变化时，式(9-21)可表示电压变化和电阻变化之间的关系。为了找出这个关系，可以用新电阻$R_1+\Delta R_1$代替R_1，用输出偏移电压ΔV_{out}代替V_{out}。这样式(9-21)改写为：

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{ex}}=\frac{R_1+\Delta R_1}{R_1+\Delta R_1+R_4}-\frac{R_2}{R_2+R_3} \tag{9-22}$$

整理方程可以得到所需要的电阻变化与实测输出电压之间的关系：

$$\frac{\Delta R_1}{R_1}=\frac{\frac{R_4}{R_1}\left(\frac{\Delta V_{out}}{V_{ex}}+\frac{R_2}{R_2+R_3}\right)}{\left(1-\frac{\Delta V_{out}}{V_{ex}}-\frac{R_2}{R_2+R_3}\right)}-1 \tag{9-23}$$

通过测量输出电压的变化ΔV_{out}，利用式(9-23)，可以确定电阻变化ΔR_1。利用式(9-13)可以计算应变。图 9-23 中的差分缓冲放大器对于微小电阻改变所致的微小电压信号具有高输入阻抗(即不加载电桥)和高增益。

课堂讨论项目 9.9　惠斯顿电桥激励电压

激励电压的幅值对电阻变化的测量有什么不好的影响?

图 9-24 所示为当应变计的安装远离电桥电路时的引线效应。图 9-24a 是从应变计到电桥电路的两线制接线法。在这个结构中，每个引线电阻R'均附加到应变计所在桥臂上，如果导线温度发生变化，将会引起电桥支路的电阻变化，如果引线过长或者引线所处环境温度发生改变，这种影响将非常大。图 9-24b 是解决这个问题的三线制接线法。在这种连接方式中，两个相同的引线电阻附加到相邻的两个桥臂上，以使引线电阻的改变相互抵消，第三根线接到高输入阻抗电压测量电路中，由于其负载电流很小，其影响可忽略不计。三线制接线法通常采用小扁平电缆以保证各引线具有相同的温度变化，从而使由电感耦合引起的电磁干扰最小化。

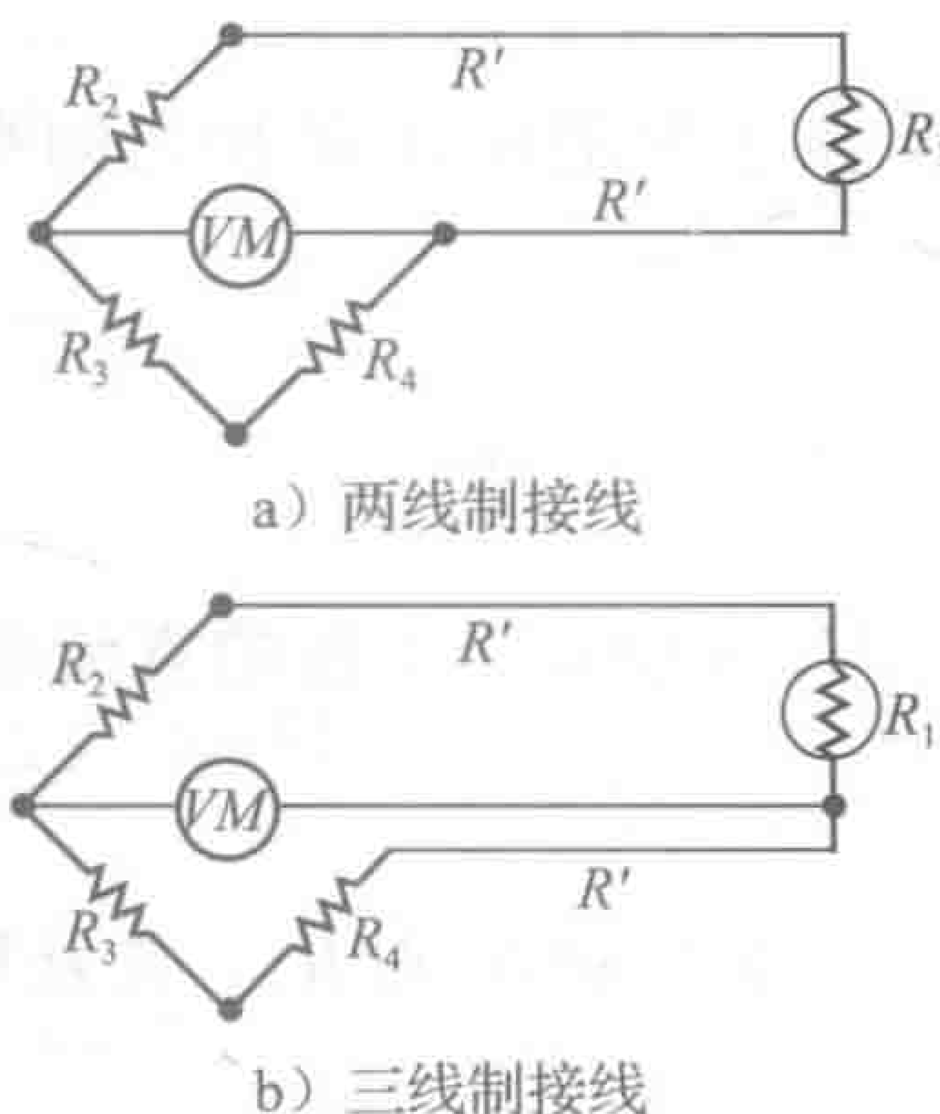


图 9-24　1/4 电桥电路引线的影响

除了引线温度的影响之外，应变计的温度变化也会带来电阻的显著变化，从而导致测量误差。消除这种影响的一种有效方法就是采用图 9-25 所示的半桥电路，其中有两个桥臂安装了电阻应变计。上面的应变计用于测量加载构件表面的应变，称为工作应变计。下面的模拟应变计安装在与被测构件具有相同材料的空载试件上，称为补偿应变计。在连接电桥时，使工作应变计与补偿应变计处于相邻的桥臂上，如果工作应变计和补偿应变计的温度始终相同，那么它们因温度变化所引起的电阻值的变化也相同，因为它们处于电桥相

邻的两臂上，其阻值变化相互抵消了温度的影响，因此电桥输出只与工作应变计产生的不平衡电压相关。

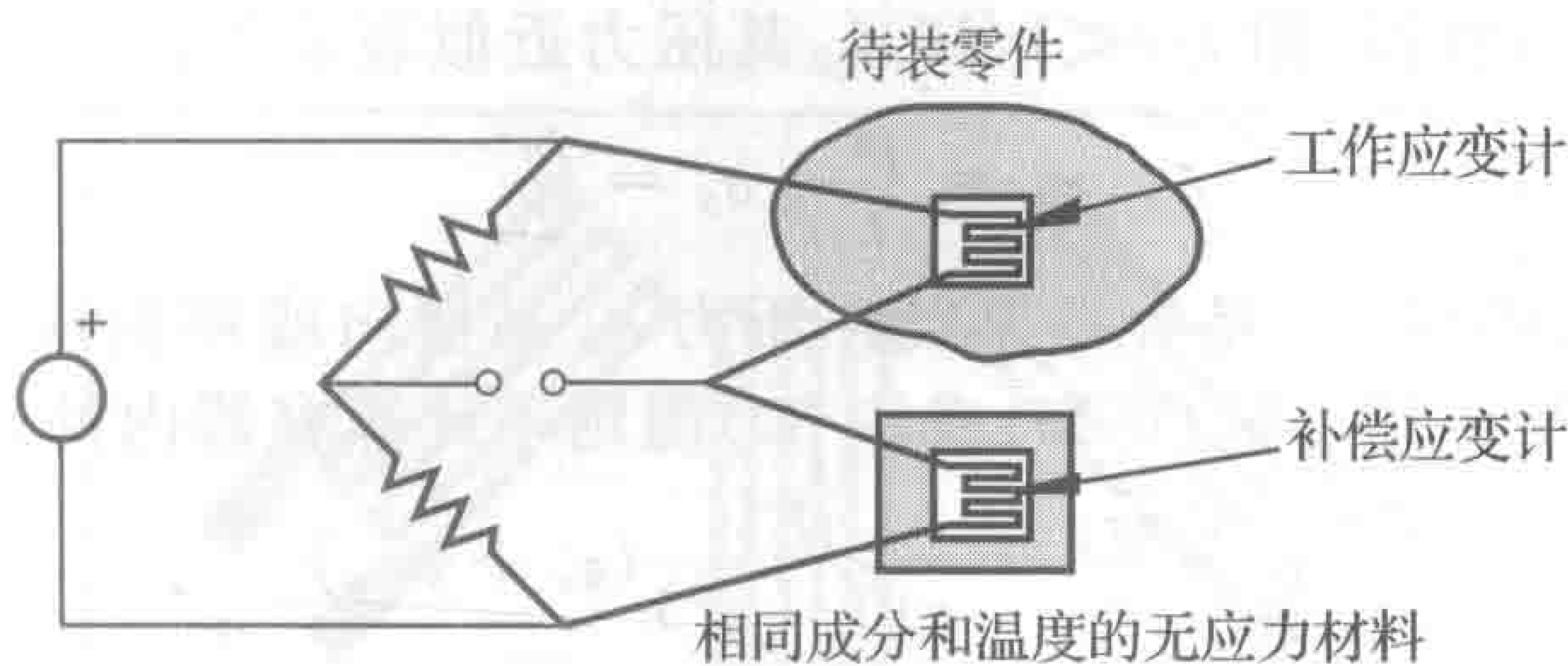


图 9-25 半桥电路中带补偿应变计

课堂讨论项目 9.10 三线电桥的电阻

非受力状态下，当图 9-24b 所示的三线桥路电阻 R_4 多大时才能产生一个平衡电桥($V_O=0$)？[提示：使用式(9-21)并假设 $R_2=R_3$。]

9.3.3 应变计测量不同状态下的应力

机械部件可能有复杂的形状并且经常面临复杂的加载条件，这会导致难以预测部件任意点上主应力的方向。但是对于一些几何形状、加载条件和主轴是已知的部件，测量应力状态则相对容易。

如果一个部件是单轴加载(如加载仅在拉伸或压缩方向)的，部件的应力状态可以用安装在负载方向上的单个应变计来确定。图 9-26 显示了一个受到拉力和相关应力状态下的杆。通过测量应变 ε_x，利用胡克定律(见附录 C)得到应力：

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \tag{9-24}$$

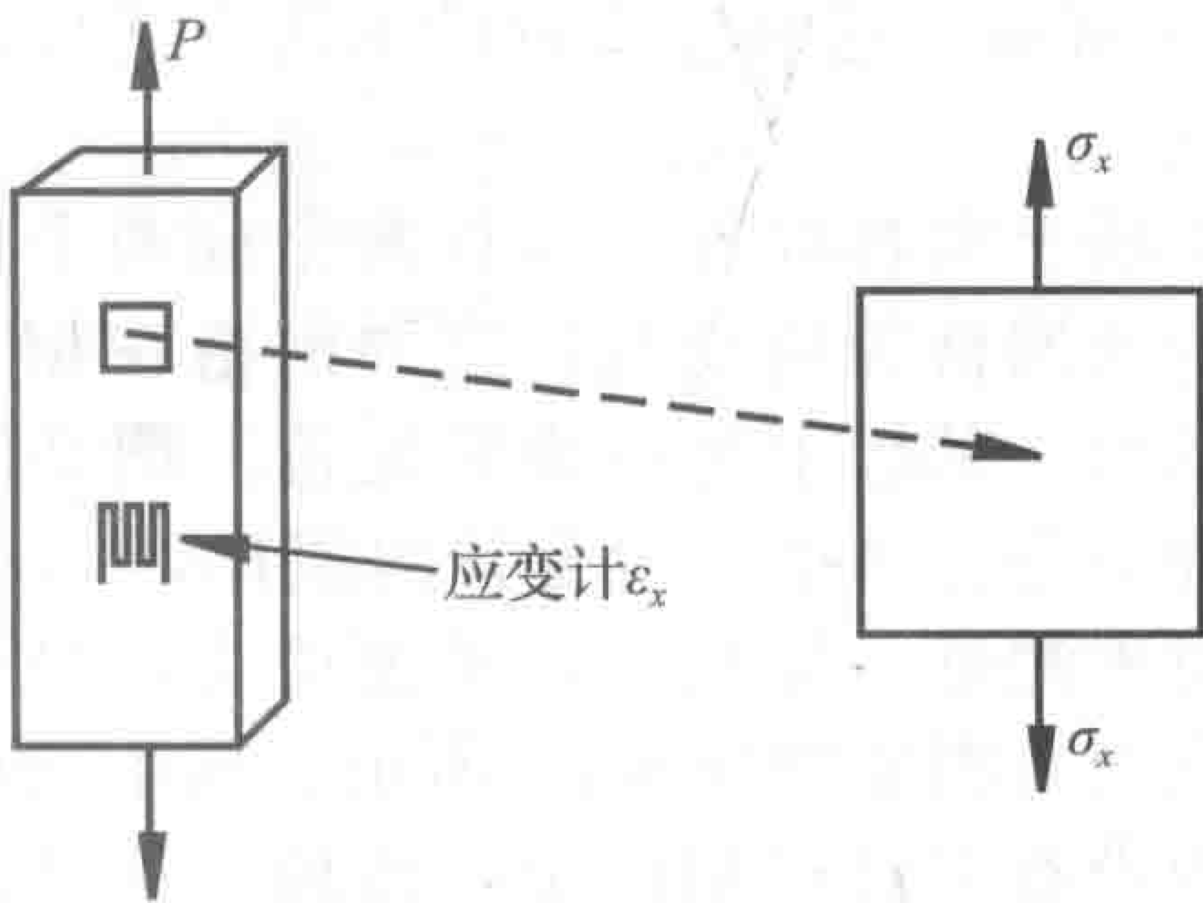


图 9-26 单轴应力下的杆

其中 σ_x 的轴向压力为：

$$\sigma_x = \frac{P}{A} \tag{9-25}$$

其中，A 是杆的横截面积。因此，杆中的力 P 可以从应变测量中获得：

$$P = AE\varepsilon_x \tag{9-26}$$

如果一个部件被双向加载(比如在拉伸或压缩的两个正交方向上加载)，则部件中的应力状态可以用两个与应力方向平行的应变计来确定。图 9-27 显示了压力容器和相关的应力状态。通过测量应力 ε_x 和 ε_y，通过胡克广义定律可以确定罐壳的应力：

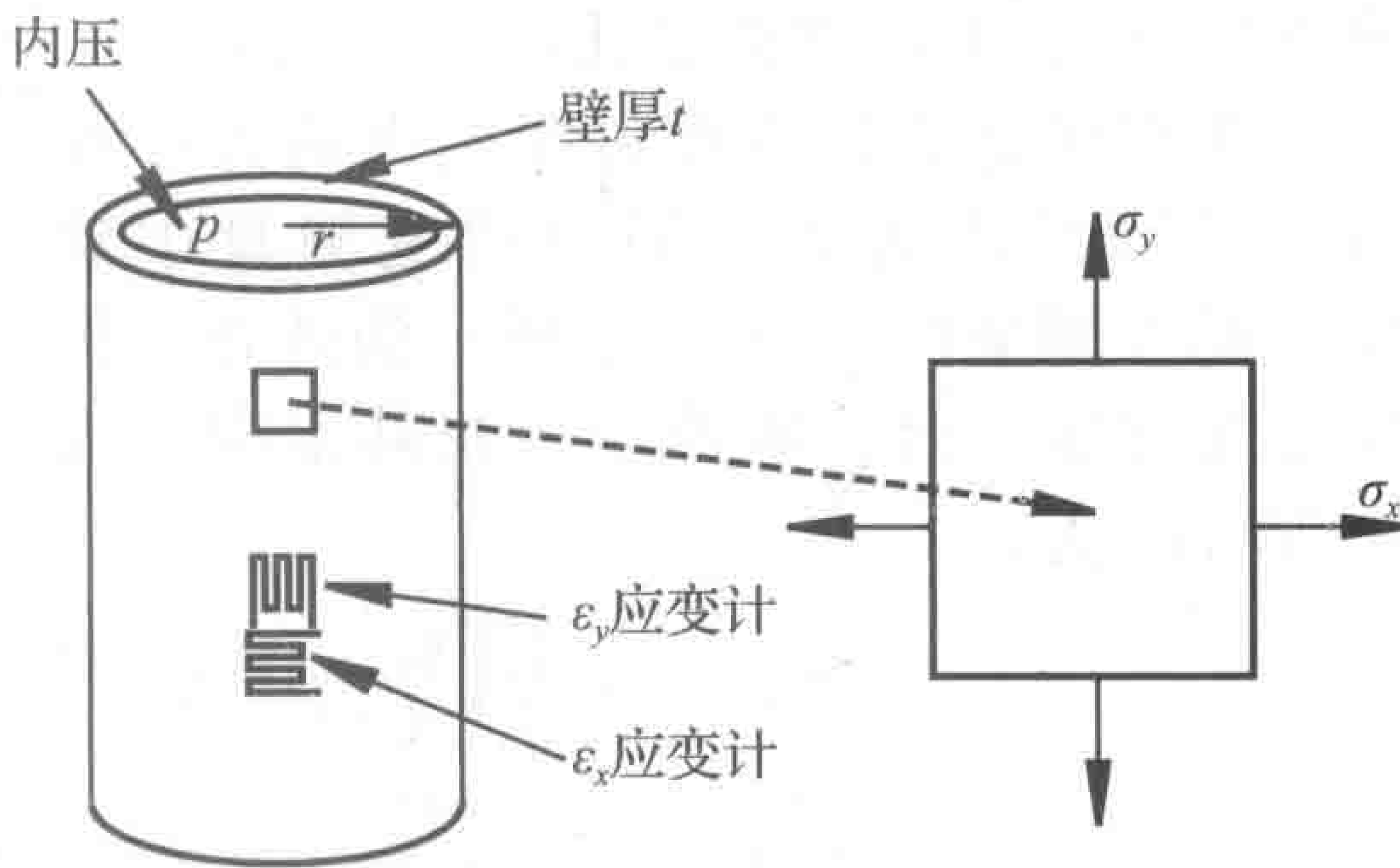


图 9-27 长薄壁压力容器中的双轴应力

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - v\frac{\sigma_y}{E} \tag{9-27}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - v\frac{\sigma_x}{E} \tag{9-28}$$

求解压力分量：

$$\sigma_x = \frac{E}{1-v^2}(\varepsilon_x + v\varepsilon_y) \tag{9-29}$$

$$\sigma_y=\frac{E}{1-v^2}(\varepsilon_y+v\varepsilon_x) \tag{9-30}$$

对于一个薄壁压力容器(即 $t/r<1/10$)，其压力近似表示为：

$$\sigma_x=\frac{pr}{t}\quad \sigma_y=\frac{pr}{2t} \tag{9-31}$$

其中，p 是内压；t 是壁厚；r 是容器半径；压力 σ_x 是横向或环向应力；σ_y 是轴向或纵向应力。基于应变计测量原则，式(9-29)或(9-30)能用于计算容器内的压力，因此：

$$p=\frac{t\sigma_x}{r}=\frac{tE}{r(1-v^2)}(\varepsilon_x+v\varepsilon_y) \tag{9-32}$$

$$p=\frac{2t\sigma_y}{r}=\frac{2tE}{r(1-v^2)}(\varepsilon_y+v\varepsilon_x) \tag{9-33}$$

对于一个理想的薄壁容器，上述两个表达式都将产生正确的压力值和无误差测量。在这个例子中，应变计用作压力变送器。

对于单轴和双轴加载，我们已知部件中主应力的方向，因此，我们只需要一个或两个应变计分别去确定应力的大小。然而，当加载更复杂或几何形状更复杂时，这也是机械设计中常见情形，我们必须使用安装在 3 个不同方向的 3 个应变计，如图 9-28 所示。这种应变计的安装方式称为**应变花**。

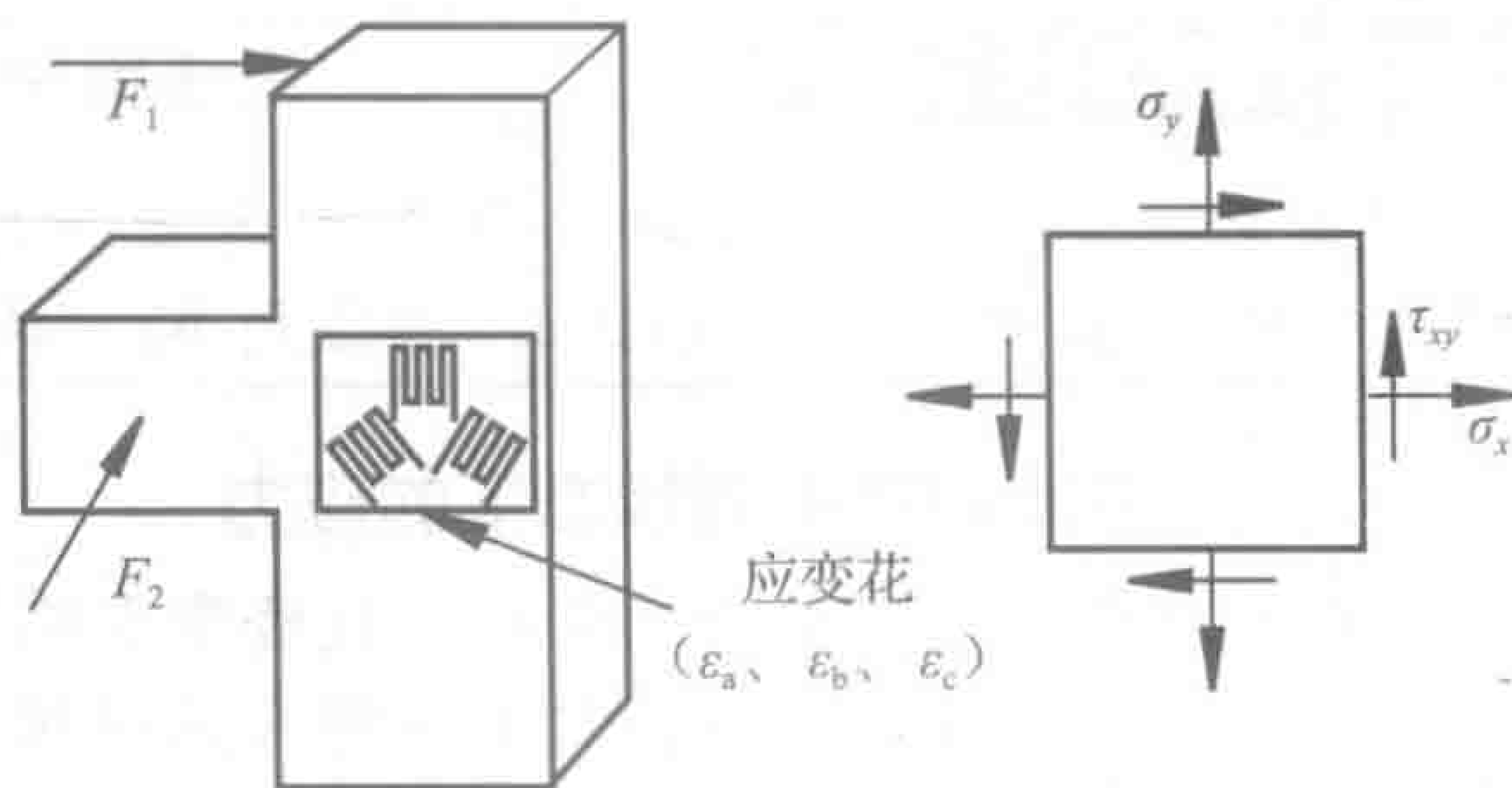


图 9-28　构件表面的平面应力的一般状态

市场上有各种各样具有两个或两个以上的应变网格的应变花，这种网格在相互接近的单一基板上可以准确定位。图 9-29 是各种应变花和单一应变计的照片。

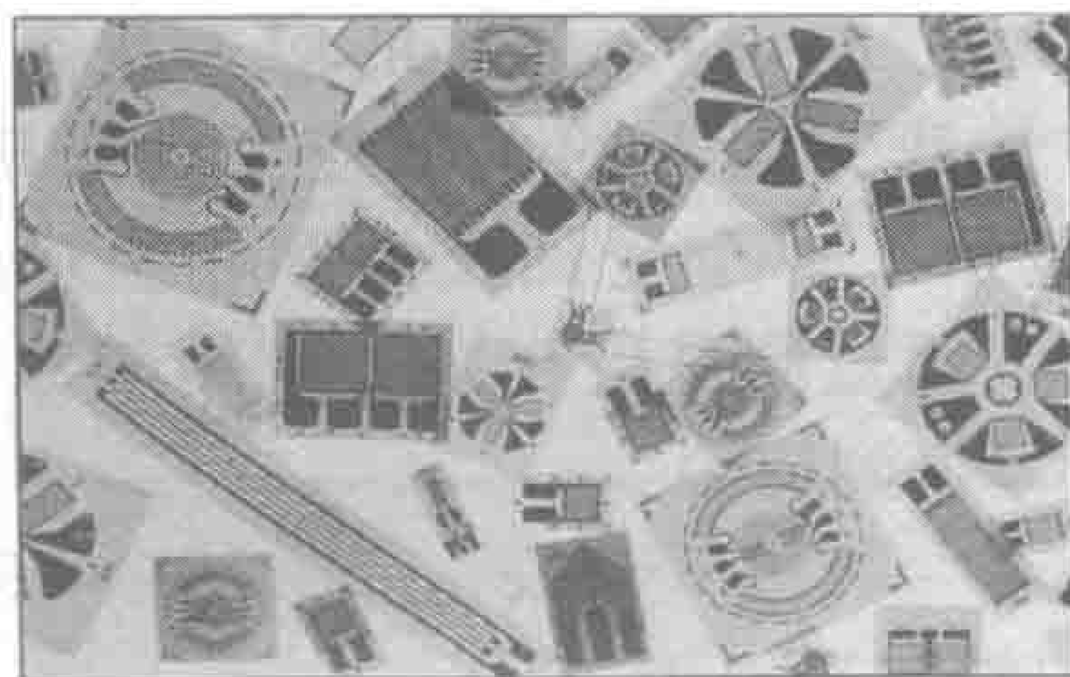


图 9-29　不同应变计和应变花的结构类别(资料来源：测量集团)

对于测量一般状态的平面应力，最常见的应变花图案如图 9-30 所示。其中网格显示为带有字母标记的单一线段。这些应变花中，矩形应变计是最常见的结构，其中应变计相差 45°安装(见图 9-31)。图 9-32 显示了几种商品化的三应变花。

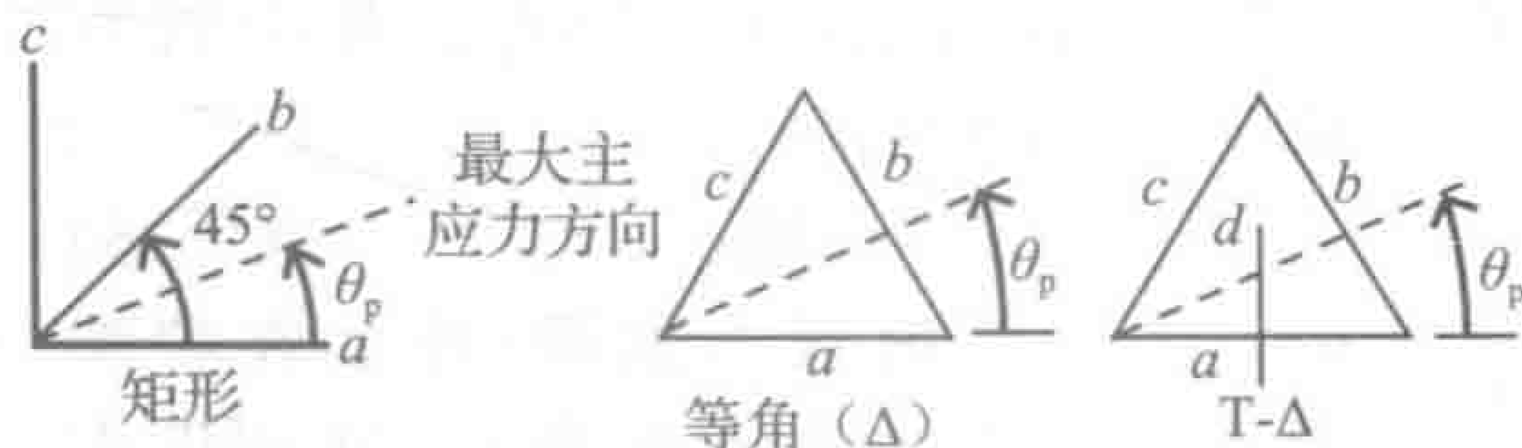


图 9-30　最常见应变花的结构

根据固体力学原理，主应力的大小和方向可以直接从 3 个同步应变测量中确定，同步测量使用图 9-30 所示的任意一种应变花方案。对于矩形应变花其主应力大小和方向为：

$$\sigma_{\max,\min}=\frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_a+\varepsilon_c}{1-v}\pm\frac{1}{1+v}\sqrt{2(\varepsilon_a-\varepsilon_b)^2+2(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2}\right] \tag{9-34}$$

$$\tau_{\max}=\frac{E}{2(1+v)}\sqrt{2(\varepsilon_a-\varepsilon_b)^2+2(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2} \tag{9-35}$$

$$\tan 2\theta_p=\frac{2\varepsilon_b-\varepsilon_a-\varepsilon_c}{\varepsilon_a-\varepsilon_c} \tag{9-36}$$

其中，ε_a、ε_b 和 ε_c 是每个应变计的应力；θ_p 是应变计从“a”到最大主应力方向的角度。当使用式(9-36)计算 θ_p 时，必须使用对象限敏感的反正切来计算。如果分子是正的(即 $\varepsilon_b>(\varepsilon_a+\varepsilon_c)/2$)，则 $2\theta_p$ 位于第一或第二象限，所以 $0<\theta_p<90°$。否则，$2\theta_p$ 位于第三

或第四象限，则$-90°<\theta_p<0$。

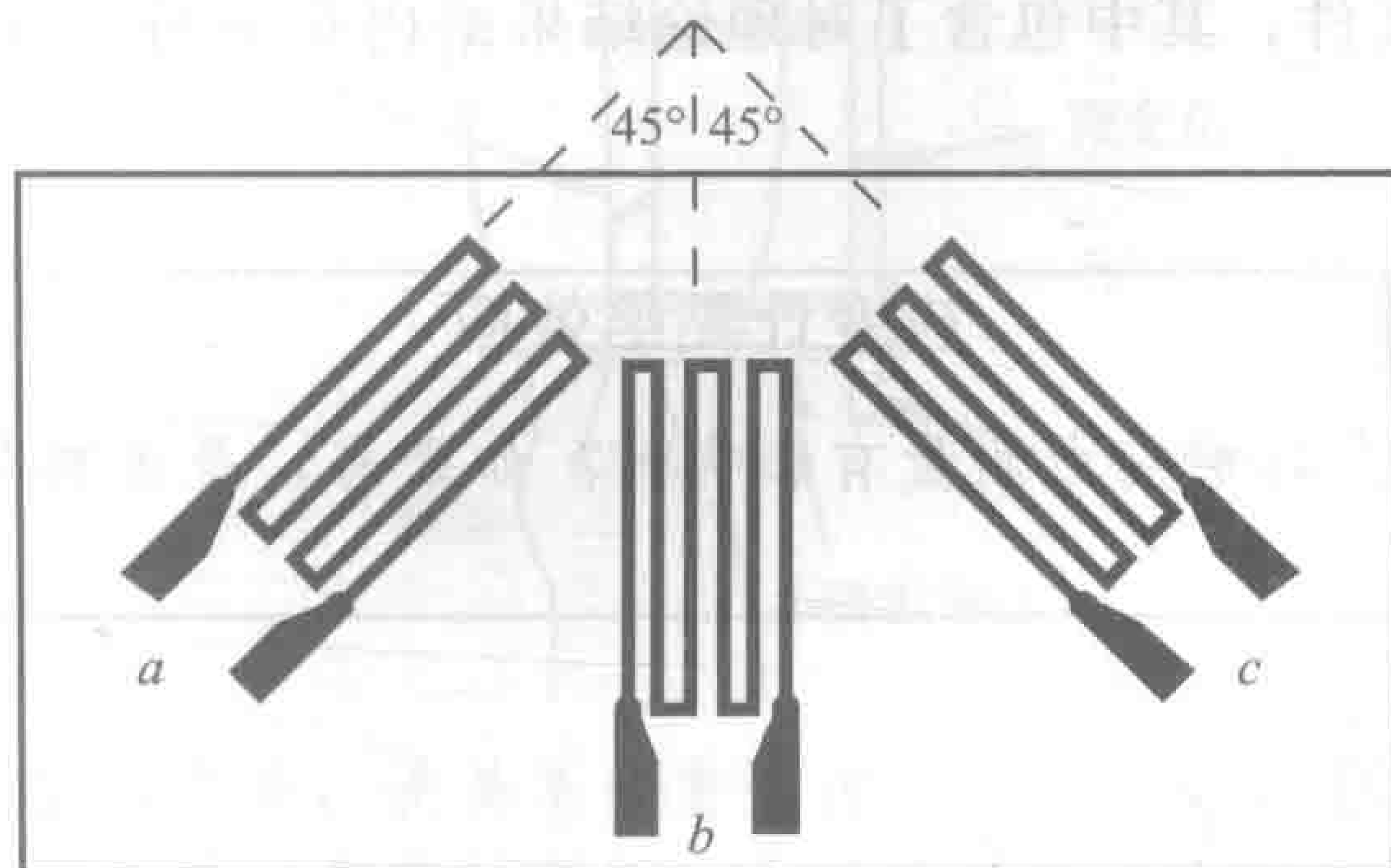


图 9-31　矩形应变花

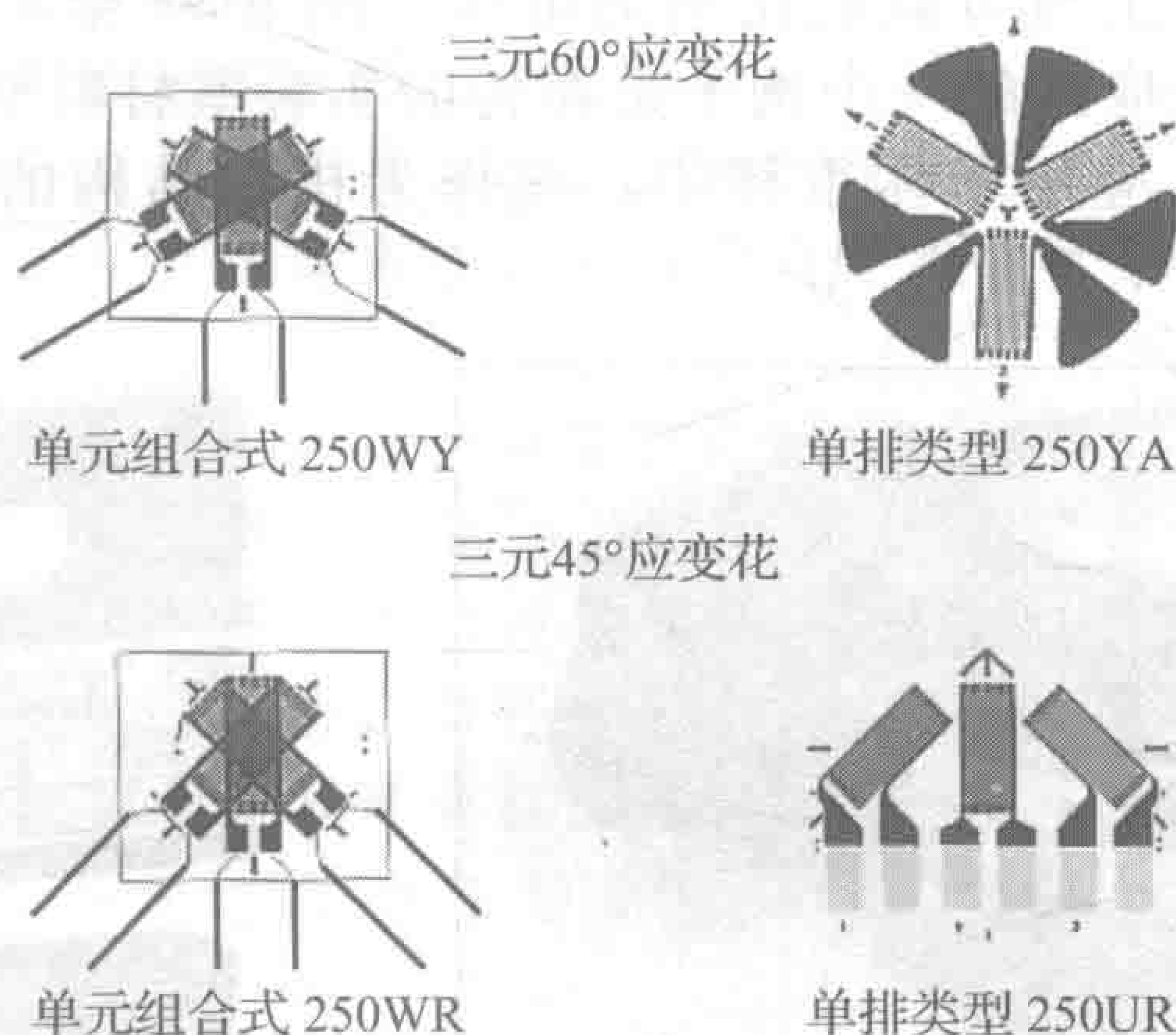


图 9-32　各种商用三应变花(资料来源：测量集团)

对于等角应变花：

$$\sigma_{\max,\min}=\frac{E}{3}\left[\frac{\varepsilon_a+\varepsilon_b+\varepsilon_c}{1-v}\pm\frac{1}{1+v}\sqrt{2(\varepsilon_a-\varepsilon_b)^2+2(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2+2(\varepsilon_c-\varepsilon_a)^2}\right] \quad (9\text{-}37)$$

$$\tau_{\max}=\frac{E}{3(1+v)}\sqrt{2(\varepsilon_a-\varepsilon_b)^2+2(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2+2(\varepsilon_c-\varepsilon_a)^2} \quad (9\text{-}38)$$

$$\tan 2\theta_p=\frac{\sqrt{3}(\varepsilon_c-\varepsilon_b)}{2\varepsilon_a-\varepsilon_b-\varepsilon_c} \quad (9\text{-}39)$$

如果式(9-39)中分子是正的(即$\varepsilon_c>\varepsilon_b$)，则$2\theta_p$位于第一或第二象限，所以$0<\theta_p<90°$。否则，$2\theta_p$位于第三或第四象限，有$-90°<\theta_p<0$。

对于具有四个应力计的 T-Δ 应变花：

$$\sigma_{\max,\min}=\frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_a+\varepsilon_d}{1-v}\pm\frac{1}{1+v}\sqrt{(\varepsilon_a-\varepsilon_d)^2+\frac{4}{3}(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2}\right] \quad (9\text{-}40)$$

$$\tau_{\max}=\frac{E}{2(1+v)}\sqrt{(\varepsilon_a-\varepsilon_d)^2+\frac{4}{3}(\varepsilon_b-\varepsilon_c)^2} \quad (9\text{-}41)$$

$$\tan 2\theta_p=\frac{2(\varepsilon_c-\varepsilon_b)}{\sqrt{3}(\varepsilon_a-\varepsilon_d)} \quad (9\text{-}42)$$

如果式(9-42)中分子是正的(即$\varepsilon_c>\varepsilon_b$)，则$2\theta_p$位于第一或第二象限，所以$0<\theta_p<90°$。否则，$2\theta_p$位于第三或第四象限，有$-90°<\theta_p<0$。

实验练习 13 考察了如何使用应变花和商用应变计进行应变测量。使用这些测量可以

计算相应的应力，并与预期的理论结果相比较。视频演示 9.10 展示了一个实验。网络链接 9.4 指向一个 PDF 文件，其中包含了对理论结果的内在分析。视频演示 9.11 讨论了分析结果。

课堂讨论项目 9.11　　应变计黏结效应

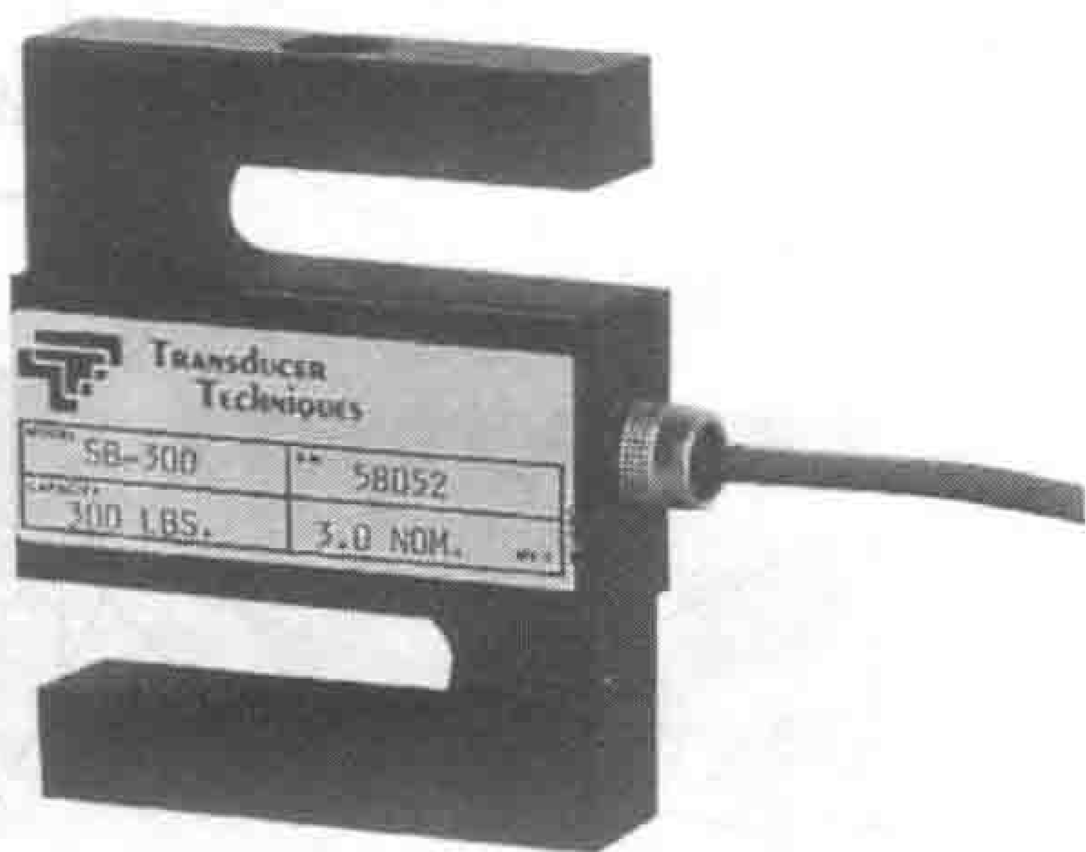
应变计粘贴在零件上，对应力测量有影响吗？如果有，是怎样影响的？这些影响在什么情况下是显著的？

9.3.4　负载传感器测力

一个负载单元就是一个测力传感器。它包含一个内部弯曲部件，通常有几个应变计安装在其表面。设计弯曲部件的形状以便应变计的输出与所施加的力有关。负载单元通常连接到电桥电路，以产生与负载成比例的电压。图 9-33 给出了两个测量单轴力的商用负载传感器。负载单元应用的一个例子是在售的实验室材料测试机，用于测量施加到试样上的力。负载单元也应用于体重秤中，或作为机械结构的组成部分来监测结构中的力。



a）MTS系统公司生产的产品



b）MTS系统公司生产的产品

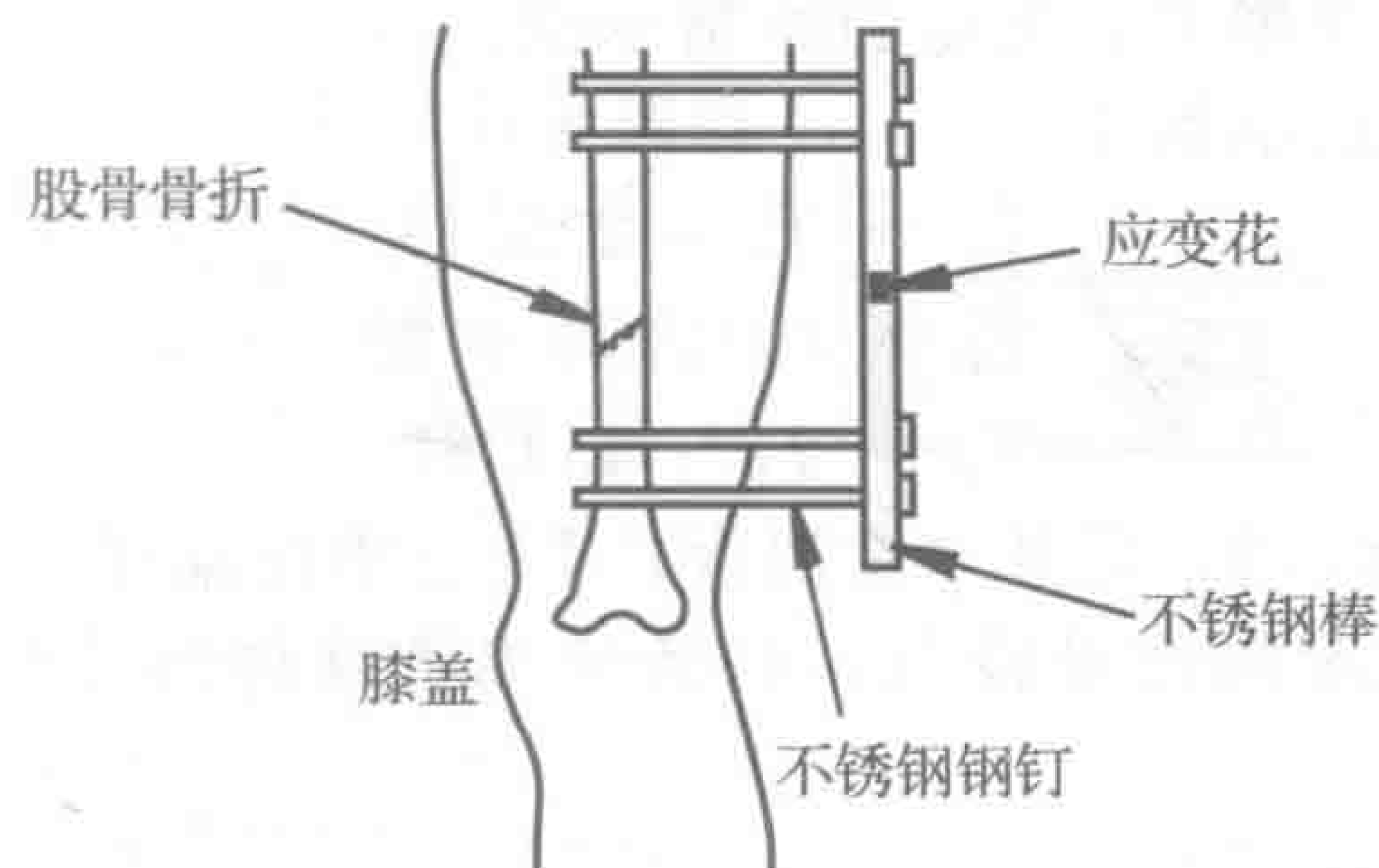
图 9-33　典型轴向负载单元

设计实例 9.1　　外置骨骼固定器的应变计负载单元

骨科生物力学涉及骨骼系统载荷分析和理解生物组织力学特性的工程方法，当骨骼失效时选择适当的系统以取代组织，这是医疗保健领域中一个重点发展行业，给工程师研究生物或医学知识提供了许多机会。许多感兴趣的工程设计问题与以下方面都有关系：植入材料的选择，材料在人体恶劣环境中的长期强度，必须安全附着在生物组织上的工程材料规范。置换关节是迄今为止最成功的设计之一，你可能知道有人用不锈钢或钛假体代替了关节。

我们参与了许多令人兴奋的生物工程研究项目，其中最有趣的是对严重骨折患者的肢体负载进行分析。当一个人的腿骨遭受多发性骨折时，使用简单的石膏或玻璃纤维石膏是不足以让骨头愈合的。骨骼是持续生长变化的活组织。有趣的是，在骨骼初步愈合阶段和保持正常方面，应力表现得非常重要。例如，在失重的空间环境下，由于缺乏重力，宇航员会并发骨质量丢失。

对于严重断裂成许多碎片的骨头，一个有趣的生物力学发明经常用来帮助骨骼愈合，它称为外置骨骼固定器，如下图所示。它由固定在身体外的不锈钢销上的结构棒组成，将不锈钢钢钉打入骨碎的位置直到骨骼愈合。因此，当动物或人行走时，该结构承载了身体的大部分负载。



为了合理设计固定器的大小，使其不会变形过多从而影响骨骼愈合，了解病人行走时骨骼固定器的加载状态很重要。愈合过程的一个微妙特征是，少量的骨应力是愈合所必需的。如果所有的应力都从骨头中移除，碎片之间就不会发生相对运动，骨头将不会愈合。但太多的相对运动会阻碍愈合。

为了验证研究结论，需要对负载幅值进行检测，为此，设计了一个作为骨骼固定器一部分的负载单元，以监测行走过程中发生的复杂的负载状态。我们对支撑断腿的圆柱不锈钢棒的负载特性很感兴趣，在行走过程中，骨骼负载是相当复杂的，包括轴向应力、弯曲应力和扭转应力。

我们的目标是设计一个负载单元，当对象行走时我们能够轻松可靠地确定轴向、弯曲和扭转载荷。我们可以通过在钢棒上相隔90°安装3个矩形应变花完成轴向、弯曲和扭转载荷的确定。各应变花(见图9-31)的中心与钢棒的轴线对齐。

只要计算出每个应变花的主应力，即可确定轴向、弯曲和扭转载荷。轴向的主应力可以用来确定两个方向上的轴向载荷和弯曲载荷。每个应变花上的最大剪应力取平均值后可确定扭转载荷。因此，9个应变计(3个应变花)可以同步测量轴向载荷、弯曲载荷和扭转载荷。

为了获得准确的测量结果，9个应变计连接到应变计电桥电路上。一个电桥测试台，(如2100测试台)可以提供多达10个桥路同时测量。电桥测试台的模拟输出按适当的采样频率数字化，以产生实时应力分布。

课堂讨论题项目 9.12　　**采样率固定器应变计**

在设计实例9.1中，对典型的人类行走姿态，对于骨骼固定器应变计一个合适的采样率是多少？

9.4 温度测量

温度是许多工程系统中的一个重要变量，工程师也应该熟悉测量的基本方法。温度传感器出现在建筑物、化工厂、发动机、运输车辆、家电、计算机和许多需要监测和控制温度的其他设备中。

由于许多物理现象与温度相关，所以我们可以利用这种依赖关系通过测量诸如压力、体积、电阻和应变来间接测量温度，然后根据被测量和温度之间的物理关系转换为温度值。

用于表示温度的单位有：

- 摄氏度(℃)：相对温度的通用国际单位。
- 开尔文温标(K)：绝对热力学温度的标准国际单位。注意没有度符号。
- 华氏温度(°F)：相对温度的英制单位。

- 兰氏温标(°R)：绝对热力学温度的英制单位。

这些单位之间的关系总结如下：

$$T_C = T_K - 273.15 \tag{9-43}$$

$$T_F = (9/5)T_C + 32 \tag{9-44}$$

$$T_R = T_F + 459.67 \tag{9-45}$$

其中，T_C 是摄氏温度；T_K 是开尔文温度；T_F 是华氏温度；T_R 是兰氏温度。

下面介绍用于测量温度的常见设备，包括玻璃管液体温度计、双金属片、电阻温度计、热敏电阻和热电偶。

9.4.1 玻璃管液体温度计

玻璃管液体温度计是一个简单的非电温度测量装置。它通常使用酒精或汞作为工作流体，相对于玻璃容器膨胀和收缩。上限温度范围通常为 600℉。当在液体中进行测量时，浸入深度是很重要的，因为它可以产生不同的测量结果。因为读数是目视的，所以在工作流体的顶部有一个弯液面，必须仔细观察。

9.4.2 双金属片

在简单控制系统中使用的另一个非电温度测量装置是**双金属片**。如图 9-34 所示，它是由两种或多种具有不同热膨胀系数的金属层组成的。如图 9-34 所示，该金属片可以是笔直的，也可以为了更紧凑的设计而盘绕着(比如在视频演示 9.4 中所示的旧温控器)。由于各层的热膨胀系数不同，且各层永久黏结在一起，当温度变化时，双金属片的整体结构会变形，从而引起双金属片的曲率 δ 发生变化。双金属片广泛使用在家庭和工业温控器上，其中金属片的机械运动促使电气开关接通或断开连接，从而开启或关闭相应的加热或冷却系统。

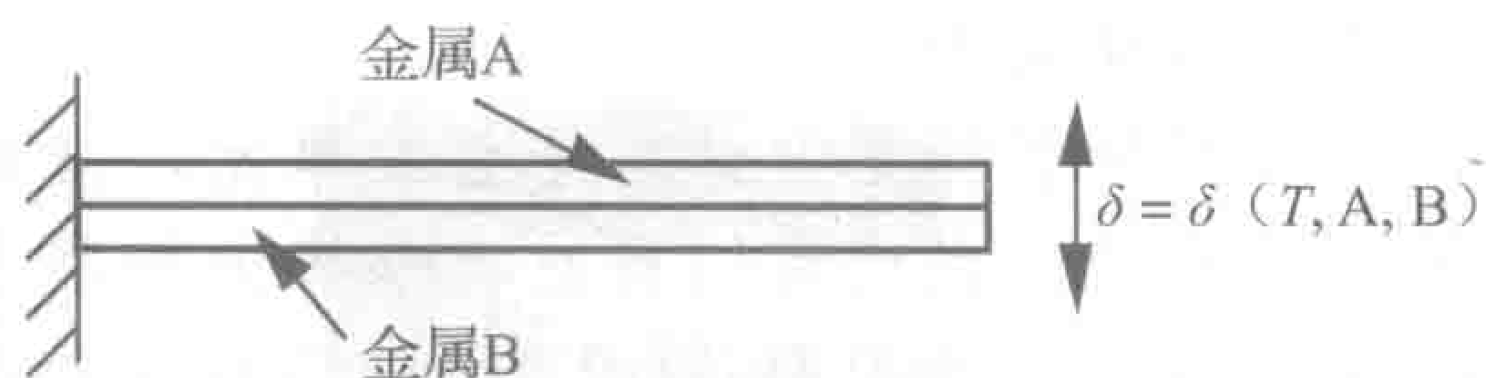


图 9-34 双金属片

9.4.3 电阻温度计

电阻温度计(RTD)是由缠绕在陶瓷或玻璃芯上的金属线和密封保护构造而成。金属丝的电阻随温度升高而增大。电阻与温度的关系通常由以下线性表达式来表示：

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \tag{9-46}$$

其中，T_0 是基准温度；R_0 是基准温度处的电阻；α 是一个常数。灵敏度(dR/dT)为 $R_0\alpha$。基准温度通常是水的冰点(0℃)。电阻温度计中最常用的金属是铂，因为其有以下特点：熔点高、耐氧化、可预测的温度特性和稳定的校准值。一个典型铂热电阻工作范围为 −220℃～750℃。也可用低成本的镍和铜来代替铂，但它们的工作范围较窄。

热敏电阻是一个半导体器件，可用于不同形状和大小的探头上，其电阻随温度呈指数变化。它的电阻-温度关系通常表达为下列形式：

$$R = R_0 e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]} \tag{9-47}$$

其中，T_0 是基准温度；R_0 是基准温度处的电阻；β 是材料的**特征温度**的校准常数。一个校准好的热敏电阻可以精确到 0.01℃或更好，比典型的电阻温度计精度高。然而，热敏电阻相比电阻温度计，具有更窄的工作范围。式(9-47)表明，热敏电阻的电阻值实际上随温度的升高而降低。这与金属导体截然不同，其电阻值随着温度的升高而增加(见 2.2.1 节)。

9.4.4 热电偶

相互接触的两个异类金属(见图 9-35)形成热电结，它产生与结温成正比的电压，称为**塞贝克效应**。

由于电路必须闭合，所以热电结成对出现，产生所谓的**热电偶**。一个包含两个热电结的热电偶电路如图 9-36 所示。图中，由金属线 A 和 B 形成的热电结处于不同的温度 T_1 和 T_2 下，产生一个可以测量的电势 V。热电偶电压 V 取决于 A 和 B 的金属特性和结点温度 T_1 和 T_2 之间的差异。热电偶电压与结温差成正比。

$$V = \alpha(T_1 - T_2) \tag{9-48}$$

其中，α 称为**塞贝克系数**。在本节稍后将看到，电压与温度差的关系不完全是线性关系。然而，在一个小的温度范围内，α 近似不变。

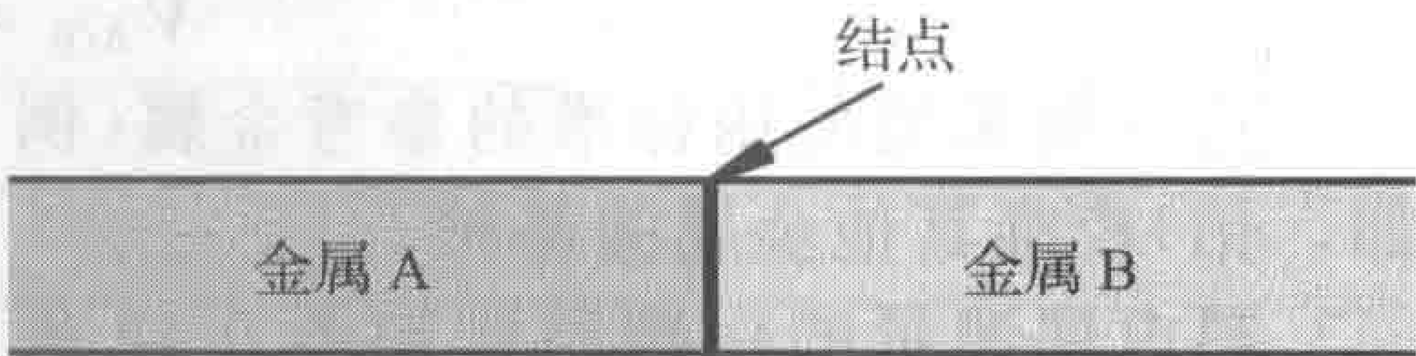


图 9-35 热电偶结点

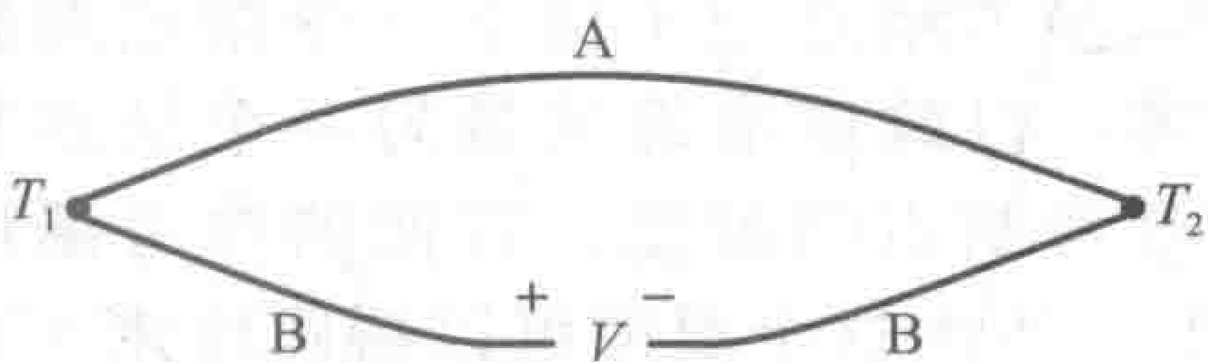


图 9-36 热电偶电路

第二热电效应又称为珀耳帖和汤普森效应，它与热电偶电路中的电流有关，但与塞贝克效应相比，这些在测量系统中通常可以忽略不计。然而，对具有大电流的热电偶电路，其影响将变得不可忽视。珀耳帖效应涉及在热电结处电流到热流的转换。这种效应也是**热电制冷器**(TEC)或冰箱的基础。

为了正确使用热电偶设计温度测量系统，有必要了解关于热电偶的基本定律。热电偶现象遵循 5 个基本定律。

1. 端子线温度定律。在两个不同导电金属组成的电路中，两个热电结处的热电电压仅取决于结点温度 T_1 和 T_2。如图 9-37 所示，引线的温度环境远离热电结(T_3，T_4，T_5)，不影响测量的电压。因此，不需要在环境条件中屏蔽导线。

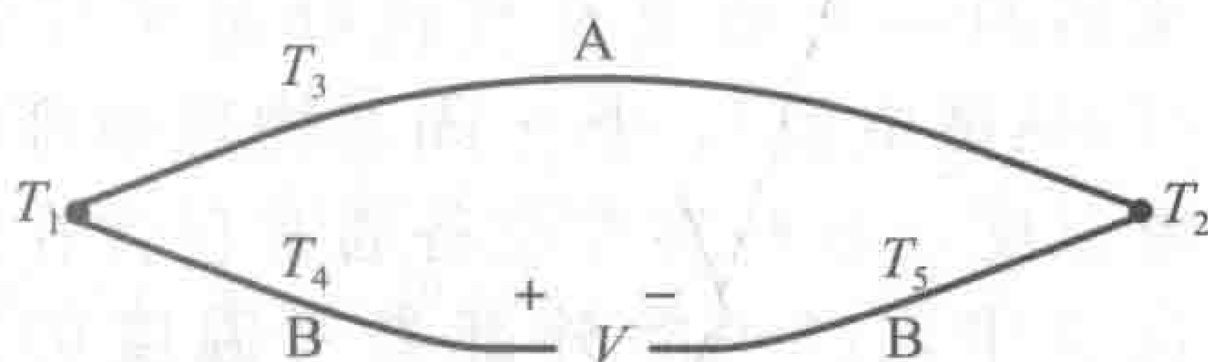


图 9-37 端子线温度定律

2. 中间端子线金属定律。如图 9-38 所示，只要两个新结点的温度(A-C 和 C-A)是相同的($T_3 = T_4$)，则在构成热电偶的电路中引入的第三种金属 C 对产生的电压没有影响。因此根据此定律，可以在热电偶电路中插入测量两个新结点的电压装置，而不改变所产生的电压。

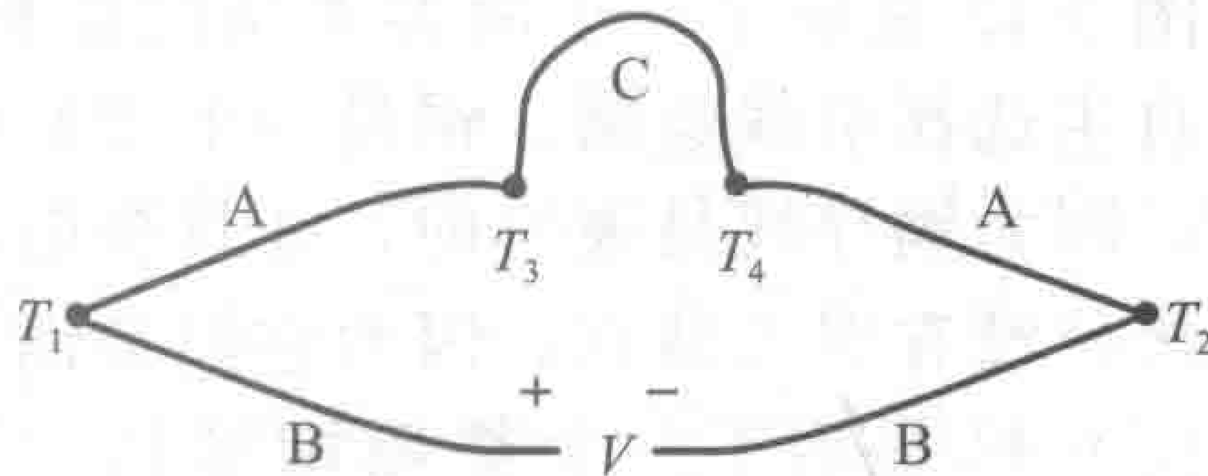


图 9-38 中间端子线金属定律

3. 中间结点金属定律。如图 9-39 所示，如果第三种金属引入热电结内将导致两个新的热电结产生(A-C 和 C-B)，那么只要两个新结点处于相同的温度($T_1 = T_3$)，则测得的电压不会受到影响。因此，焊接或钎焊热电偶接头，对测得的电压没有影响。如果 $T_1 \neq T_3$，C 处的有效温度是两个温度的平均值$(T_1 + T_3)/2$。

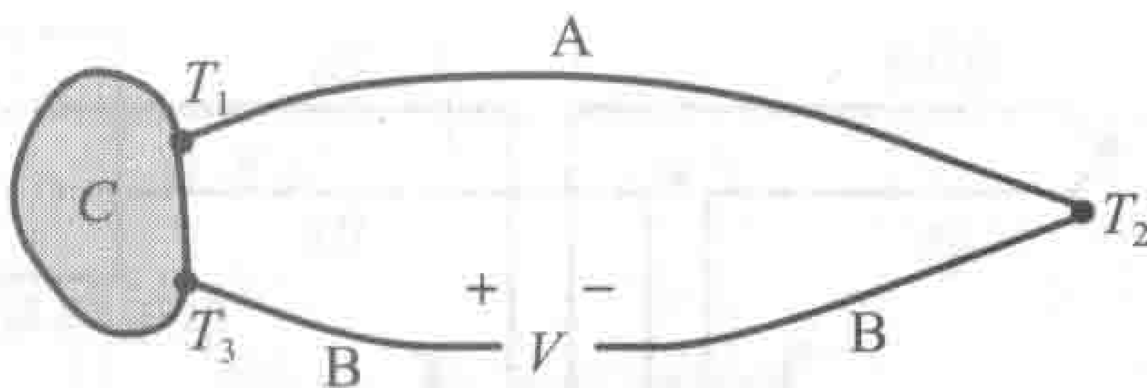


图 9-39 中间结点金属定律

4. 中间温度定律。处于 T_1 和 T_3 处的结点对产生相同的电压，因为它们横跨相同的温度范围(T_1 到 T_2、T_2 到 T_3)，如图 9-40 所示，

$$V_{1/3} = V_{1/2} + V_{2/3} \tag{9-49}$$

上述方程可以解释为：温度 T_1 相对于 T_3 产生的电压是 T_1 相对于 T_2 与 T_2 相对于 T_3 产生的电压之和。这一结果是基于固定温度的参考结点精确测量未知温度的基础(详述如下)。

5. 中间金属定律。如图 9-41 所示，由两种金属 A 和 B 产生的电压与每个金属(A 和

B)相对于第三种金属C产生的电压之和相等：

$$V_{A/B} = V_{A/C} + V_{B/C} \tag{9-50}$$

这一结果是使用标准的参考金属(例如，铂)校准其他金属的基础。

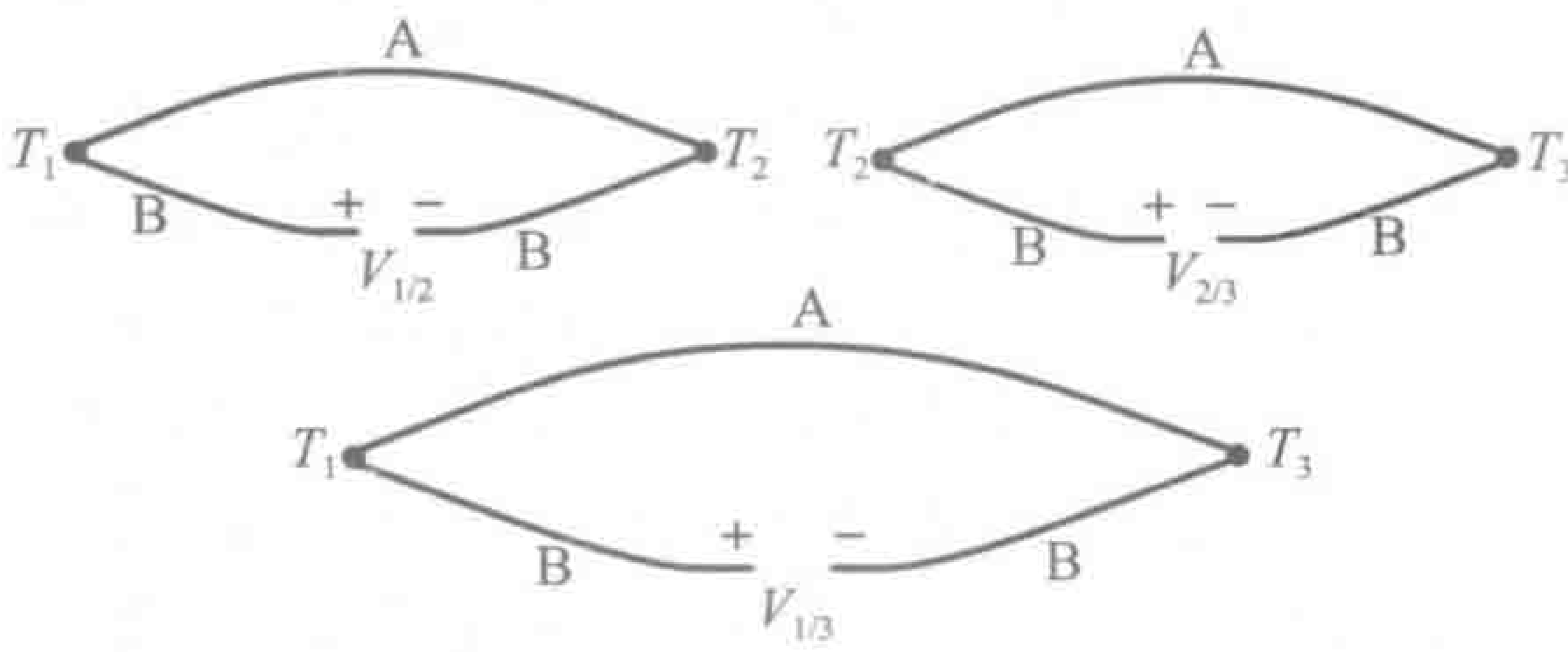


图 9-40　中间温度定律

热电偶测量的标准结构如图9-42所示。它由两个金属线A和B组成，这两根线连接到有金属C端子的电压测量装置上。参考结点用于建立一个结点的温度基准，以确保准确测量另一个结点相对于参考结点的温度。方便的参考温度为0℃，因为这个温度可以精确地建立和保持于蒸馏水冰浴(比如，冰水混合物)中。如果电压测量装置的端子处于同一温度，则中间端子线金属定律可确保测量设备终端金属C对测量没有影响。对于给定的热电偶金属对和参考温度，可以构建一个标准参考表将测量电压转换为温度。

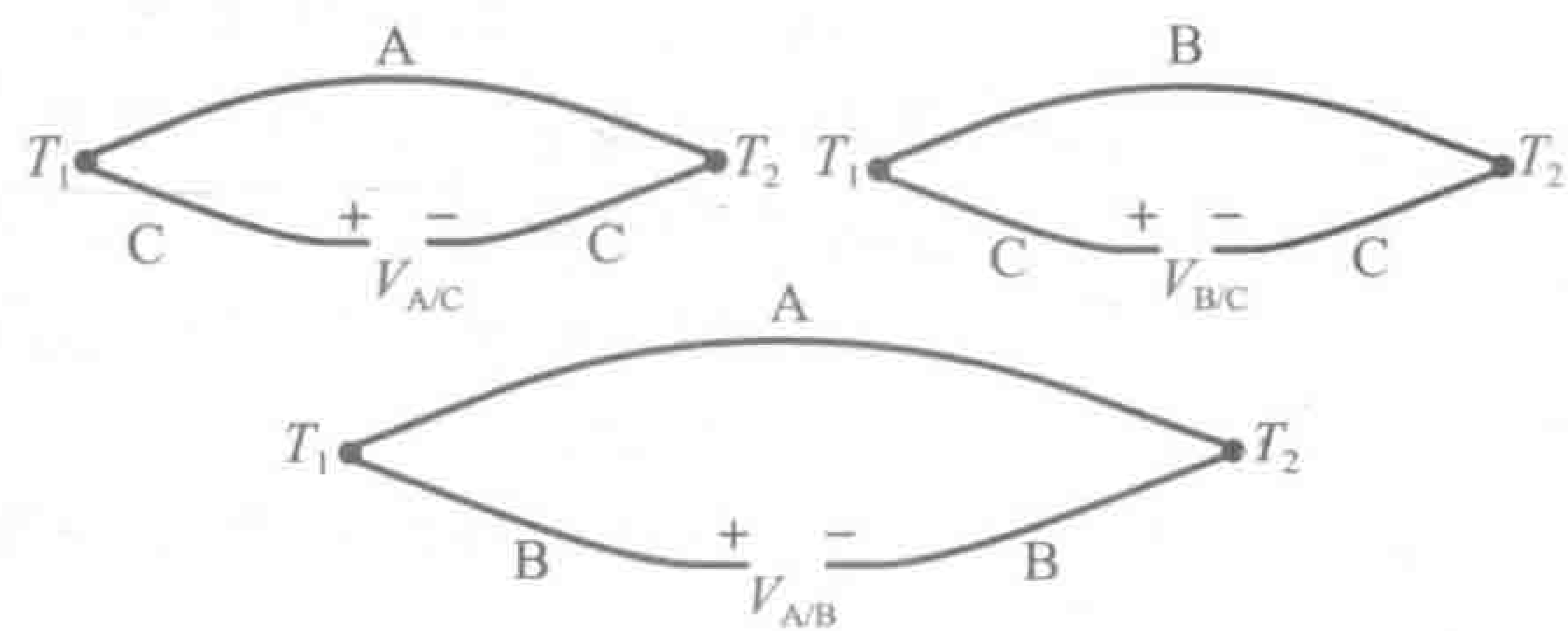


图 9-41　中间金属定律

冰浴的一个重要替代选择是半导体基准(如热敏电阻)，基于固态物理原理建立参考温度。这些参考设备通常包含在热电偶仪表中，以消除外部参考温度的需求。视频演示9.12描述了商用数字温度计，它可精确用于热电偶温度的测量。

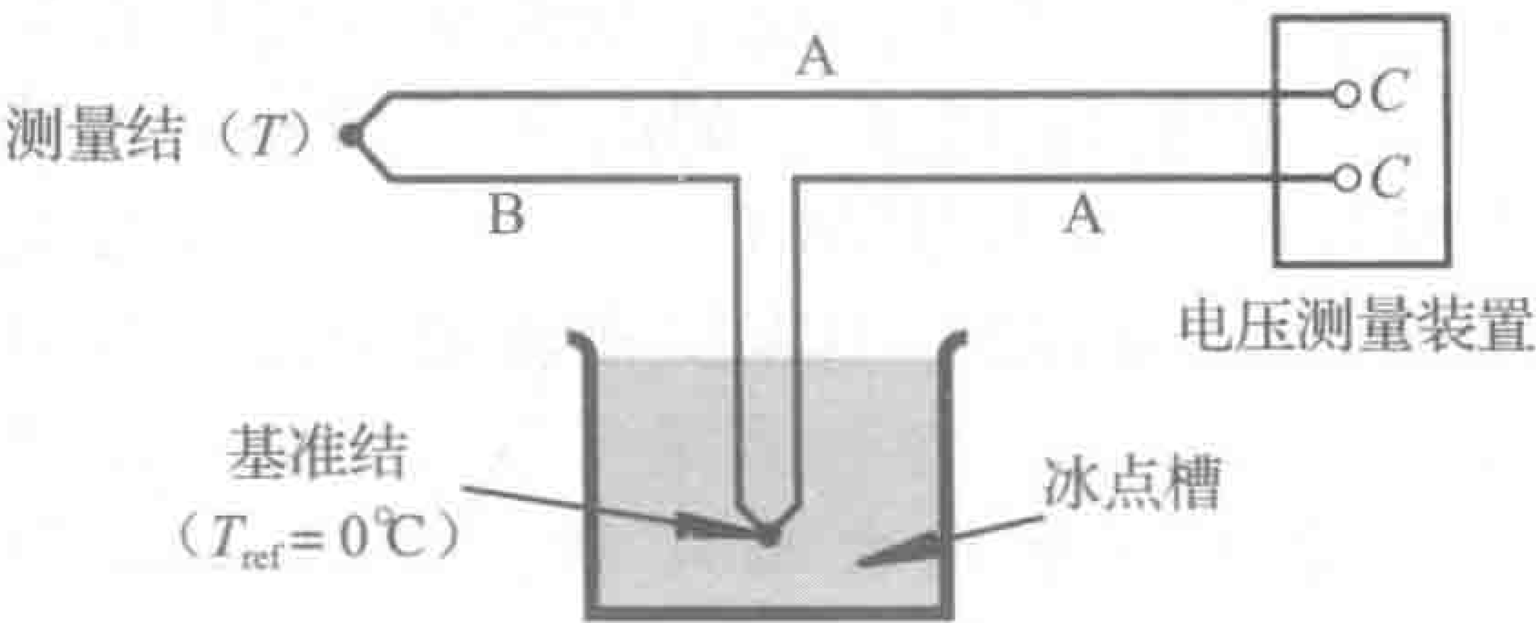


图 9-42　标准热电偶的结构

图9-43显示了一个两参考结的结构，允许自主选择引线金属。铜是一个很好的选择，因为铜导线是廉价的，并且在电压表连接处没有引入结点，因为它们是铜。

图9-44显示了一个**热电堆**结构，结合N对结点，产生一个N倍单对的电压。在图9-44所示的例子中，乘法因子为3。如果测量结点(在T)是在不同温度下，这个输出将代表这些温度的平均值。

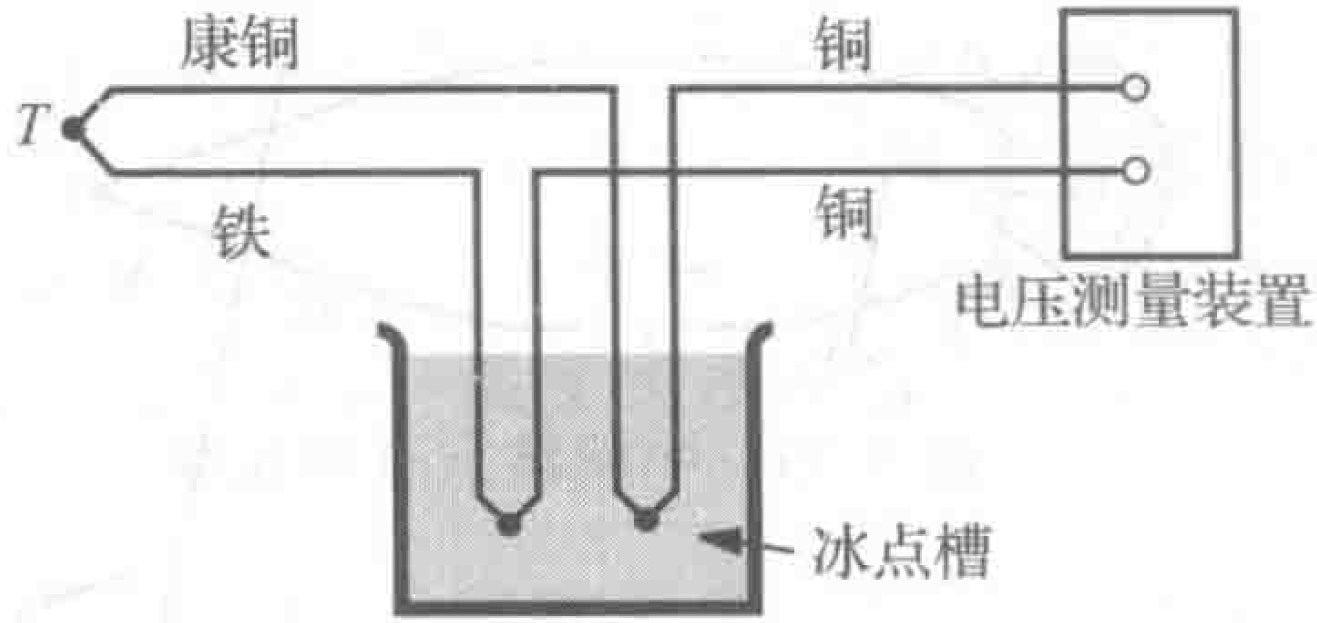


图 9-43　使用选定的金属端子线

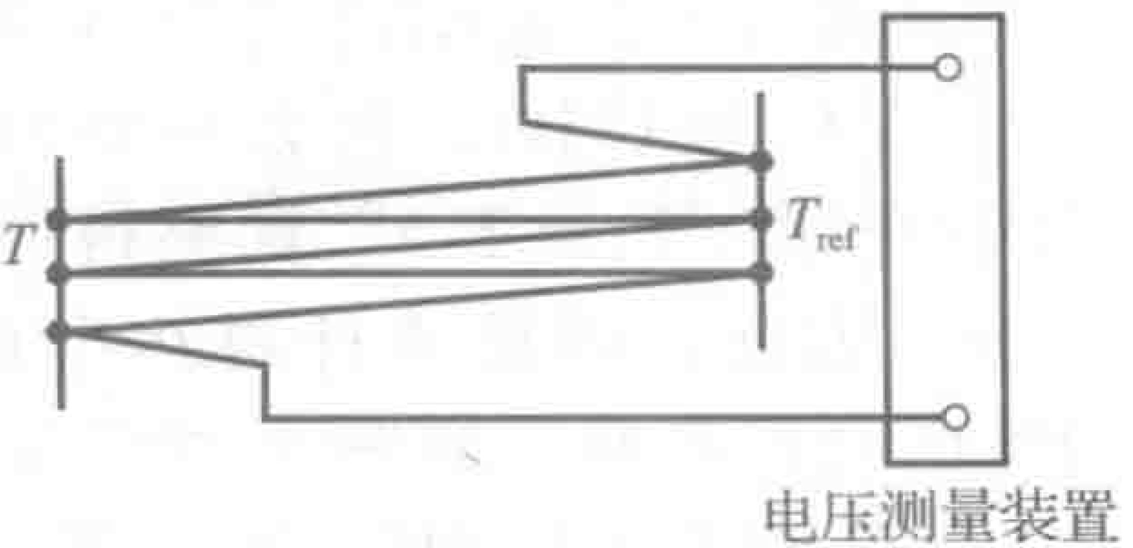


图 9-44　热电堆

例 9.2　具有非标准参考的热电偶结构

一个标准的两结热电偶可测量风洞中的温度。参考结点保持为10℃的恒定温度。我们只有一个参考到0℃的热电偶表。部分表格如下。当测量结暴露在100℃的空气中时，我们要确定其输出电压。

结点温度(℃)	输出电压(mV)
0	0
10	0.507
20	1.019
30	1.536
40	2.058
50	2.585
60	3.115
70	3.649
80	4.186
90	4.725
100	5.268

对这个例子应用中间温度定律，我们可以得到

$$V_{100/0} = V_{100/10} + V_{10/0}$$

我们想找到 $V_{100/0}$，相对10℃的基准结点测量100℃温度处的电压。从表中我们可以得到方程中的其他电压 $V_{100/0}$ 和 $V_{10/0}$，因为两者的基准都为0℃，所以：

$$V_{100/0} = V_{100/10} - V_{10/0} = (5.268 - 0.507)\text{mV} = 4.761\text{mV}$$

6个最常用的热电偶金属对分别用字母E、J、K、R、S和T表示。每种类型的0℃参考结校准是非线性的，可以用多项式近似估计。对于每种类型结点对中的金属、热电极性、常用的色标、工作范围、精度、多项式阶数和系数列于表9-2中。使用表中系数的多项式的一般形式是：

$$T = \sum_{i=0}^{9} c_i V^i$$

$$= c_0 + c_1 V + c_2 V^2 + c_3 V^3 + c_4 V^4 + c_5 V^5 + c_6 V^6 + c_7 V^7 + c_8 V^8 + c_9 V^9 \quad (9\text{-}51)$$

其中，V 是测量的热电压；T 是以0℃为参考结的测量结温。图9-45显示了一些市售热电偶对的灵敏度曲线，即使用9阶多项式表示温度与电压的关系，其精度仍然很高，并且其关系与塞贝克效应预测的线性关系相接近。MathCAD实例9.1显示了表9-2中多项式系数应用于热电偶电压计算的实例。

表9-2 热电偶数据

	E类型	J类型	K类型	R类型	S类型	T类型
金属对	镍铬(+)和康铜(−)	铁(+)和康铜(−)	镍铬(+)和镍基合金(−)	87%铂、13%铑(+)和铂(−)	90%铂、10%铑(+)和铂(−)	镀铜(+)和康铜(−)
色码	紫色	黑色	黄色	绿色	绿色	蓝色
工作范围	−100～1000℃	0～760℃	0～1370℃	0～1000℃	0～1750℃	−160～400℃
精度	±0.5℃	±0.1℃	±0.7℃	±0.5℃	±0.1℃	±0.5℃
近似灵敏度(mV/℃)	0.079	0.054	0.042	0.012	0.011	0.049
多项式的阶数	9	5	8	8	9	7
c_0	0.104 967	−0.048 868 3	0.226 585	0.263 633	0.927 763	0.100 861
c_1	17 189.5	19 873.1	24 152.1	179 075.	169 527.	25 727.9
c_2	−282 639.	−218 615.	67 233.4	$-4.884\,03\times10^{7}$	$-3.156\,84\times10^{7}$	−767 346.
c_3	$1.269\,53\times10^{7}$	$1.156\,92\times10^{7}$	$2.210\,34\times10^{6}$	$1.900\,02\times10^{10}$	$8.990\,73\times10^{9}$	$7.802\,56\times10^{7}$

（续）

	E类型	J类型	K类型	R类型	S类型	T类型
c_4	$-4.487\,03\times10^{8}$	$-2.649\,18\times10^{8}$	$-8.609\,64\times10^{8}$	$-4.827\,04\times10^{12}$	$-1.635\,65\times10^{12}$	$-9.247\,49\times10^{9}$
c_5	$1.108\,66\times10^{10}$	$2.018\,44\times10^{9}$	$4.835\,06\times10^{10}$	$7.620\,91\times10^{14}$	$1.880\,27\times10^{14}$	$6.976\,88\times10^{11}$
c_6	$-1.768\,07\times10^{11}$	—	$-1.184\,52\times10^{12}$	$-7.200\,26\times10^{16}$	$-1.372\,41\times10^{16}$	$-2.661\,92\times10^{13}$
c_7	$1.718\,42\times10^{12}$	—	$1.386\,90\times10^{13}$	$3.714\,96\times10^{18}$	$6.175\,01\times10^{17}$	$3.940\,78\times10^{14}$
c_8	$-9.192\,78\times10^{12}$	—	$-6.337\,08\times10^{13}$	$-8.031\,04\times10^{19}$	$-1.561\,05\times10^{19}$	—
c_9	$2.061\,32\times10^{13}$	—	—	—	$1.695\,35\times10^{20}$	—

资料来源：G. Burns，M. Scroger，and G. Strouse，“Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90，” NIST Monograph 175，April 1993.

ANSI标识符	合金（通用或商标）
JP	铁
JN、EN或TN	康铜，Cupron，Advance
KP或EP	Chromega，Tophel，T_1，Thermokanthal KP
KN	Alomega，镍铝合金，T_2，Thermokanthal KN
TP	铜
RN或SN	纯铂
RP	铂13%铑
SP	铂10%铑

商标：Advance T——Driver Harris公司；Chromega和Alomega——OMEGA工程公司；Cupron，镍铝合金和Tophel——Wilbur B. Driver公司；Thermokanthal KP和Thermokanthal KN——Kanthal公司

ANSI字母标识符——目前热电偶及其延长线订货时需指定ANSI字母标识符，常用热电偶类型和商标是Chromega/Alomega——ANSI K型、铁/康铜——ANSI J型、铜/康铜——ANSI T型、Chromega/康铜——ANSI E型、铂/铂10%铑——ANSI S型、铂/铂13%铑——ANSI R型。热电偶的正和负引脚分别通过字母P和N标识，如表中所示。

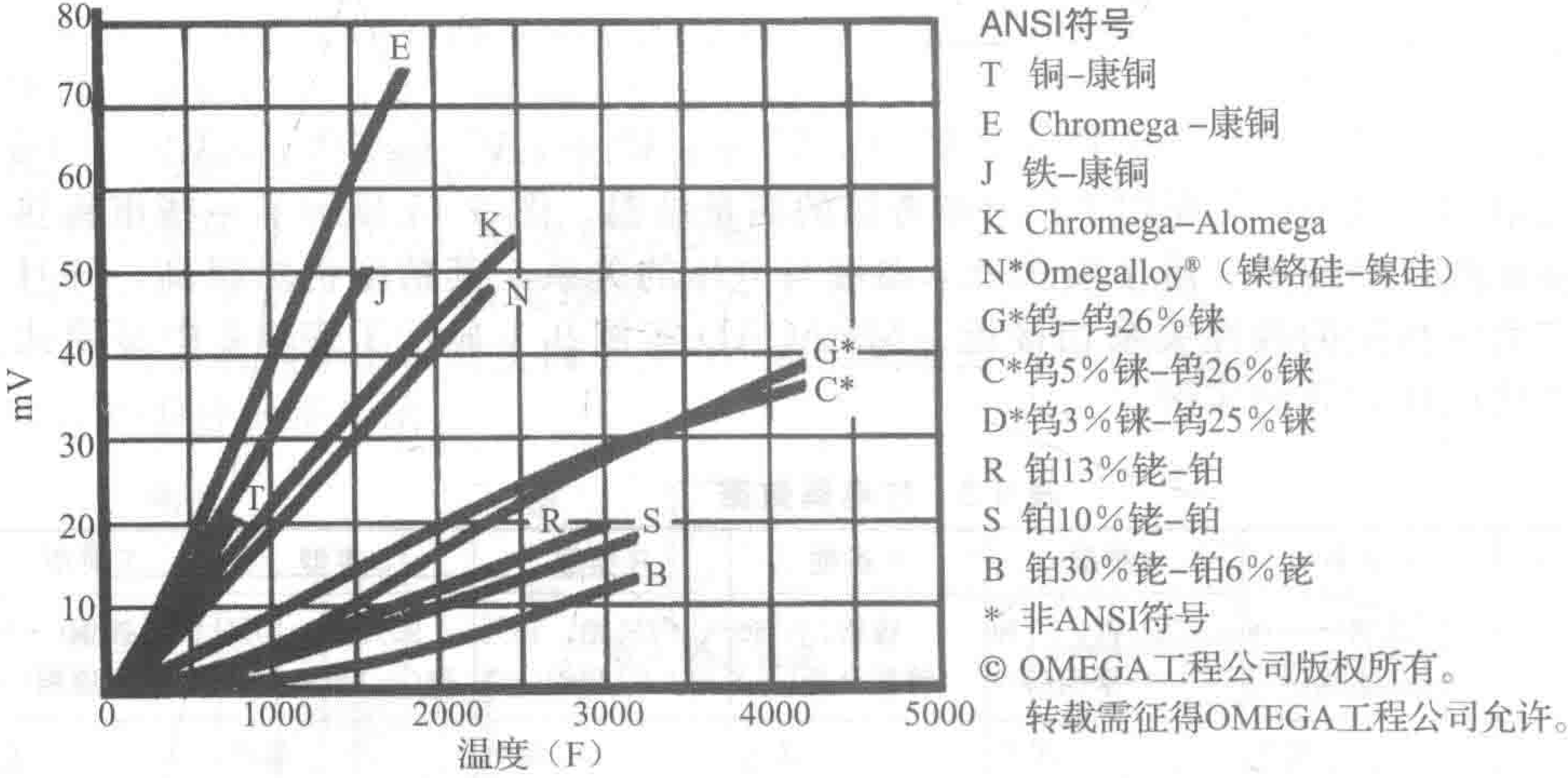


图 9-45　热电偶类型及特性（资料来源：OMEGA 工程公司）

9.5　振动和加速度测量

加速度计是测量运动产生的加速度、速度变化率、振动（如旋转机械）和冲击（如撞击汽车安全气囊）等的传感器。加速度计通过机械连接安装或粘贴于被测对象或结构上测量加速度。加速度计沿一个轴向检测加速度，对正交方向的运动不敏感。应变计或压电元件（见 9.5.1 节描述）构成加速度传感器的敏感元件，将加速度转换成电压信号。作为加速度传感的一个简单例子，视频演示 9.13 显示了一个具有闪烁灯光的玩具球，它可以感知与

反弹相关的加速度。其敏感元件仅仅是围绕金属柱的弹簧。

加速度计的设计是基于质量块的惯性效应的，质量块通过弹簧、阻尼器和位移传感器与运动对象相连。图 9-46 显示了加速度计的组成部分以及参考位移、术语和质量块的受力图。当物体加速时，外壳与振动体之间有相对运动。位移变送器检测出相对运动。通过对加速度计二阶系统的频率响应分析，可以获得位移变送器输出与物体绝对位置或加速度间的关系。

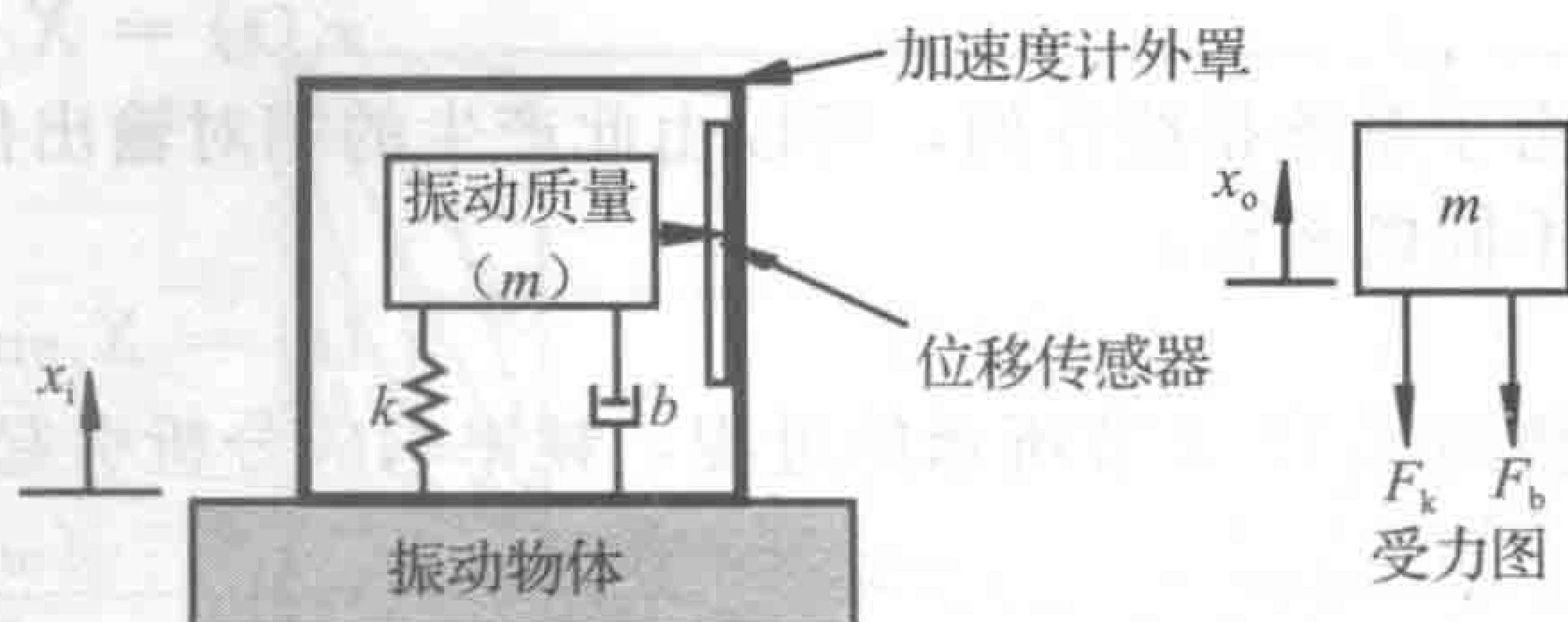


图 9-46 加速度计位移参考和受力图

为了确定加速度计的频率响应，首先分析质量块的受力图。定义振动体和物体之间的相对位移 x_r 为：

$$x_r = x_o - x_i \tag{9-52}$$

它通过振动体和壳体之间的位置变送器测量获得。因此，弹簧力可以表示为：

$$F_k = k(x_o - x_i) = kx_r \tag{9-53}$$

阻尼力可以表示为

$$F_b = b(\dot{x}_o - \dot{x}_i) = b\dot{x}_r \tag{9-54}$$

其中变量顶上的“·”表示时间导数。应用牛顿第二定律，振动体的运动方程为

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}_o \tag{9-55}$$

或者

$$-F_k - F_b = m\ddot{x}_o \tag{9-56}$$

该式中力的符号为负号，因其受力方向与参考方向 x_o 相反。代入式(9-53)和(9-54)得：

$$-kx_r - b\dot{x}_r = m\ddot{x}_o \tag{9-57}$$

由于相对位移 x_r 为：

$$x_r = x_o - x_i \tag{9-58}$$

可以用下列公式表示 $\ddot{x}_o$，即：

$$\ddot{x}_o = \ddot{x}_r + \ddot{x}_i \tag{9-59}$$

因此，我们可以重写式(9-57)为：

$$-kx_r - b\dot{x}_r = m(\ddot{x}_r + \ddot{x}_i) \tag{9-60}$$

整理得到

$$m\ddot{x}_r + b\dot{x}_r + kx_r = -m\ddot{x}_i \tag{9-61}$$

此二阶微分方程表明了实测相对位移 x_r 与输入位移 x_i 间的关系。正如在 4.10 节中分析的二阶系统一样，我们可以把这个方程重写为：

$$\ddot{x}_r + 2\xi\omega_n\dot{x}_r + \omega_n^2 x_r = -\ddot{x}_i \tag{9-62}$$

其中固有频率为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{9-63}$$

阻尼比为：

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{km}} \tag{9-64}$$

课堂讨论项目 9.13　重力对加速度计的影响

自由质量块的受力图和加速度计的运动方程没有考虑重力的影响。解释为什么这样？

根据频率响应的分析，假定输入位移为正弦形式：

$$x_i(t) = X_i \sin(\omega t) \tag{9-65}$$

由于系统是线性的，所以由此产生的相对输出位移也是具有相同频率的正弦信号，但具有不同的相位：

$$x_r(t) = X_r \sin(\omega t + \phi) \tag{9-66}$$

使用 4.10.2 节所示的过程，频率响应分析引起的振幅比(见问题 9.27)为：

$$\frac{X_r}{X_i} = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\left(\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^{1/2}} \tag{9-67}$$

且相位角为：

$$\phi = -\arctan\left[\frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right] \tag{9-68}$$

为了将相对输出位移与输入加速度联系起来，我们对式(9-65)求导，得到：

$$\ddot{x}_i(t) = -X_i\omega^2 \sin(\omega t) \tag{9-69}$$

请注意，输入加速度的振幅是：

$$X_i\omega^2 \tag{9-70}$$

整理式(9-67)，可以得到：

$$H_a(\omega) = \frac{X_r\omega_n^2}{X_i\omega^2} = \frac{1}{\left(\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^{1/2}} \tag{9-71}$$

其中，$H_a(\omega)$表示$(X_r\omega_n^2)/(X_i\omega^2)$的比值，它是频率 ω 的函数。图 9-47 和图 9-48 分别给出了在不同阻尼比下该项和相位角与频率之间的关系[见式(9-68)]。

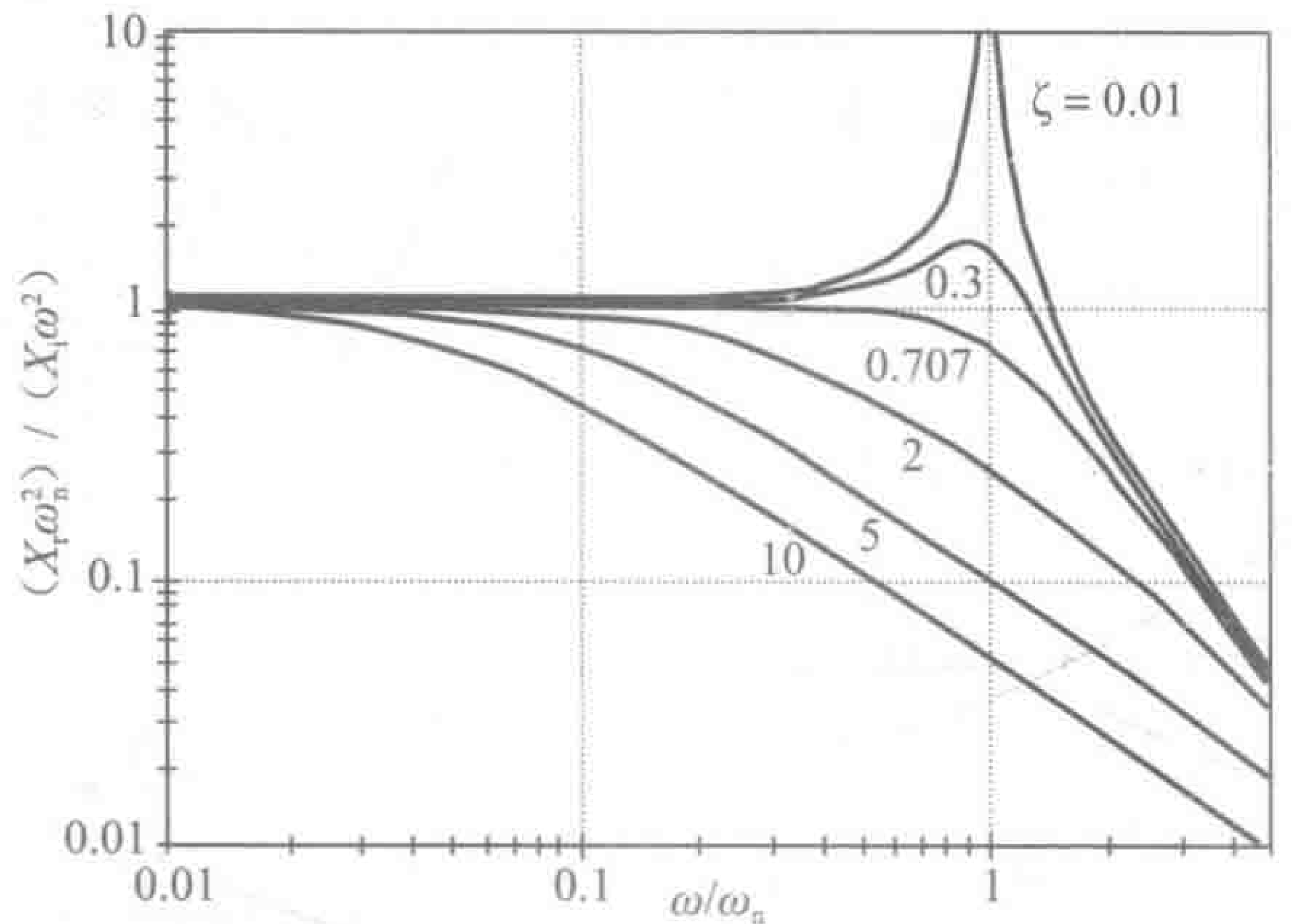


图 9-47　理想加速度计的振幅响应

$H_a(\omega)$的分母是输入加速度的振幅 $X_i\omega^2$，分子是输出位移振幅 X_r 和固有频率 ω_n^2 平方的乘积。因此，我们可以得到测量输出位移振幅与输入加速度振幅之间的关系为：

$$X_r = \left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)H_a(\omega)(X_i\omega^2) \tag{9-72}$$

因此，输入加速度的振幅可以表示为

$$(X_i\omega^2) = \frac{X_r\omega_n^2}{H_a(\omega)} \tag{9-73}$$

如果设计一个加速度计使得 $H_a(\omega)$在一个大的频率范围内近似为 1，那么根据由一个常数因子 ω_n^2 表示的相对位移振幅，输入加速度振幅可直接获得

$$(X_i\omega^2) = (\omega_n^2)X_r \tag{9-74}$$

如图 9-47 所示，当阻尼比 $\xi=0.707$ 且固有频率 ω_n^2 尽可能大时，单位振幅比出现的频率范围最大。而且，从图 9-48 中也很明显地看出，当 $\xi=0.707$ 时系统的相位线性度最好。我们可以选择一个小的振动体和一个大的弹簧常数，使得固有频率变大，从而使传感器的封装很小，这在商业加速度计中很常见。

在传感器的带宽范围内，对每个频率分量，式(9-74)均适用。如果我们有一个由带宽范围内的许多频率组成的任意输入，根据式(9-74)每个频率分量均对信号有贡献。因此，由所有频率分量合成的总加速度也直接与测量获得的整体相对位移相关：

$$\ddot{x}_i(t) = \omega_n^2 x_r(t) \tag{9-75}$$

使用与测量加速度相同的弹簧-质量块-阻尼器结构可以测量位移。这种装置称为**测振仪**。式(9-67)给出的幅值比提供了输入与输出位移之间的关系。正如对于加速度计分析，我们可以定义一个位移比为：

$$H_d(\omega) = \frac{X_r}{X_i} \tag{9-76}$$

图 9-49 显示了在不同阻尼比下振幅比与频率之间的关系。其相位关系与加速度计是相同的(见图 9-48)。与测得的相对位移振幅 X_r 有关的输入位移振幅 X_i 为：

$$X_i = \frac{X_r}{H_d(\omega)} \tag{9-77}$$

如果设计一个测振仪使得 $H_a(\omega)$ 在一个大频率范围内近似为 1，那么通过相对位移振幅，输入位移振幅可直接获得：

$$X_i = X_r \tag{9-78}$$

如图 9-49 所示，当阻尼比 $\xi=0.707$ 且固有频率 ω_n^2 尽可能小(即 ω/ω_n 是大的)时，单位振幅比出现的频率范围最大。我们可以选择一个大的振动体和一个小的弹簧常数，使得固有频率加大。这也解释了为何测量地震用的地震仪尺寸都很大。

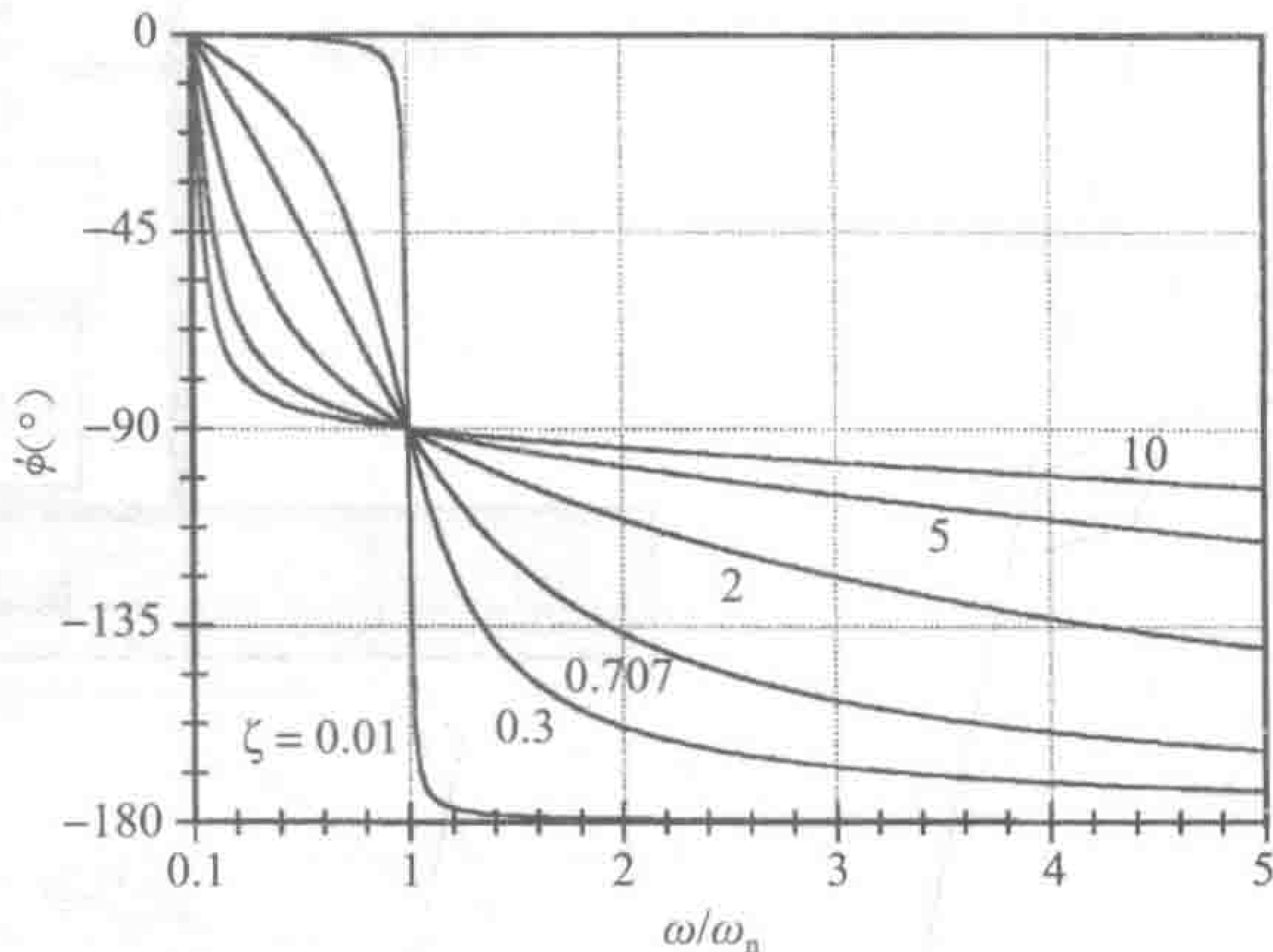


图 9-48　理想加速度计的相位响应

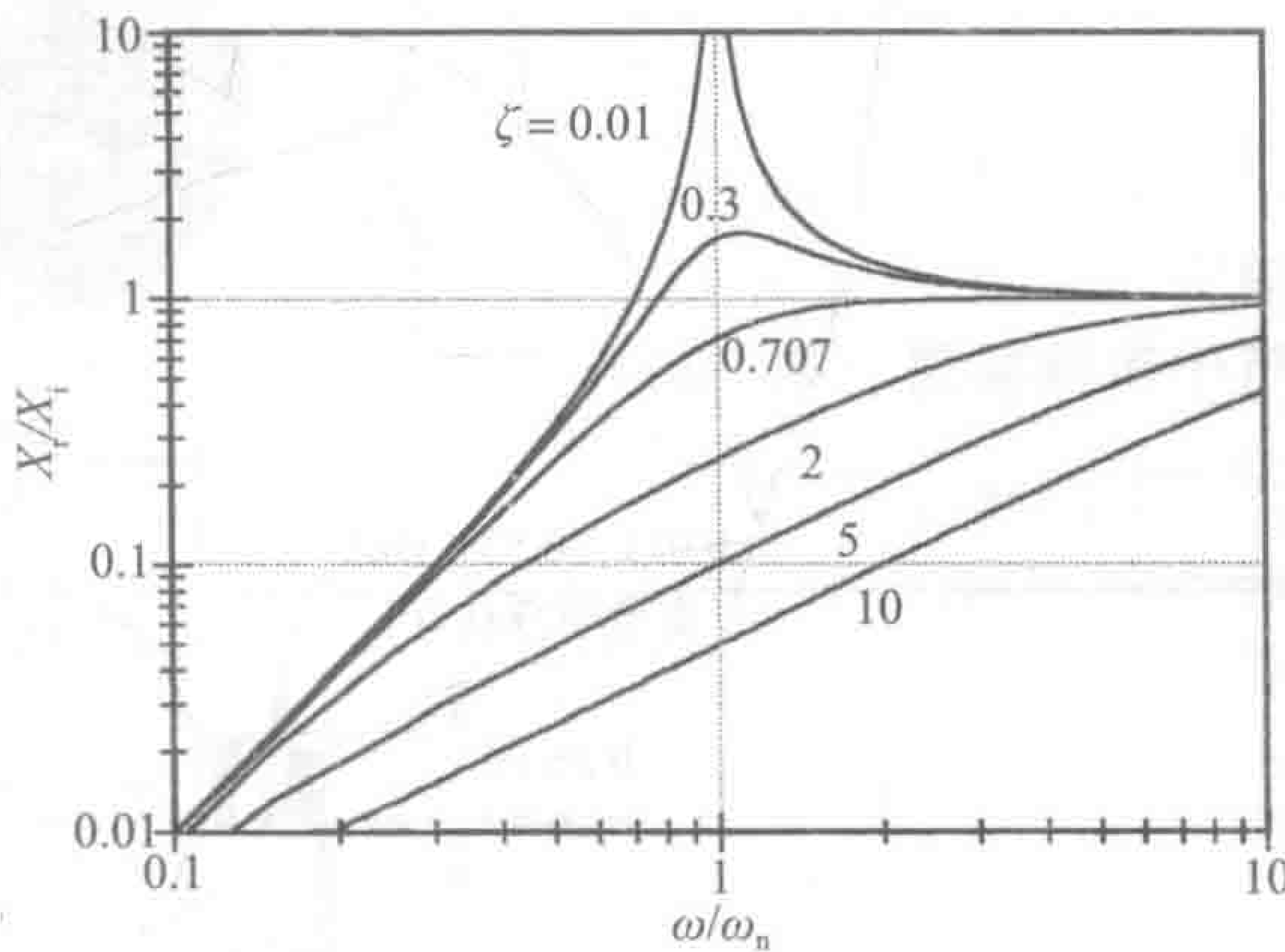


图 9-49　测振仪的振幅响应

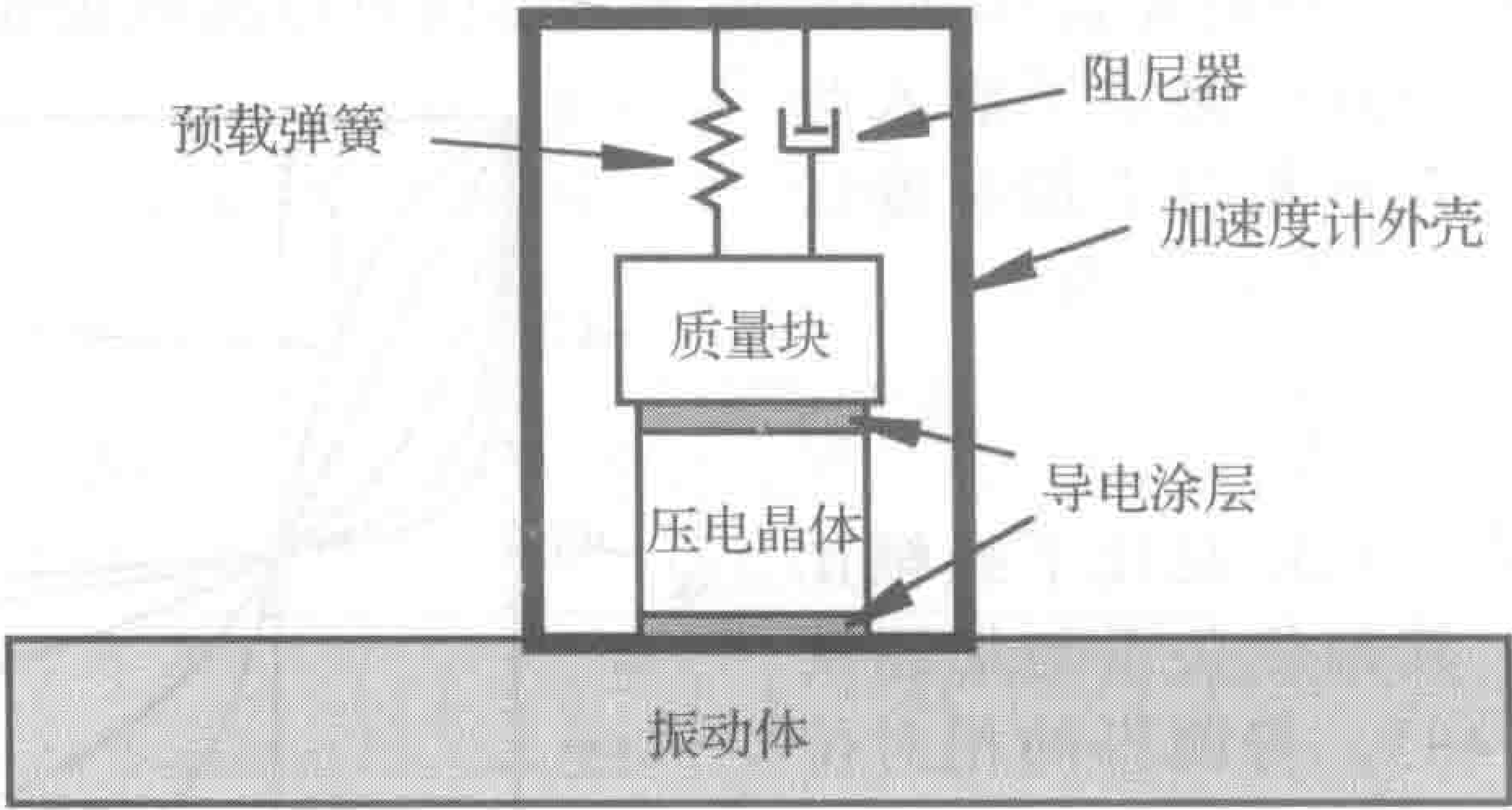
压电式加速度计

使用**压电晶体**可以构造高质量的加速度计，压电晶体是一种因变形导致其表面电荷极化的材料。反之，压电材料受到电场作用也将导致变形。如图 9-50a 所示，压电式加速度计由与质量块接触的晶体组成，由壳体中弹簧支撑。预载弹簧的作用是保持质量块与晶体相接触，并使晶体处于压缩状态，这可以延长其寿命。晶体本身也有刚度，这有助于提高系统的整体刚度。图 9-50b 所示为一个商用压电式加速度计。除了晶体固有的阻尼特性，有时也注入附加阻尼(比如用油填充外壳)。当支撑对象经历加速时，由于质量块的惯性，壳体与壳体之间发生相对位移。由于压电效应，压电晶体产生的应变会在晶体导电涂层之间产生位移电荷。请注意，使用压电晶体的加速度计不需要外部电源。此外，还要认识到，加速度计只在其安装方向上测量加速度(比如沿着弹簧、质量块和晶体的轴线)。

压电材料的尺寸越大产生的输出也越大。自然界存在的压电材料有罗谢尔盐，电气石和石英。有些晶体材料可以通过加热后在强电场中慢慢冷却人为极化从而获得压电特性，如钛酸钡、锆钛酸铅(PZT)、钛酸铅和偏铌酸铅。这些铁电陶瓷更常用在加速度计中，因为其灵敏度可以在制造过程中控制。

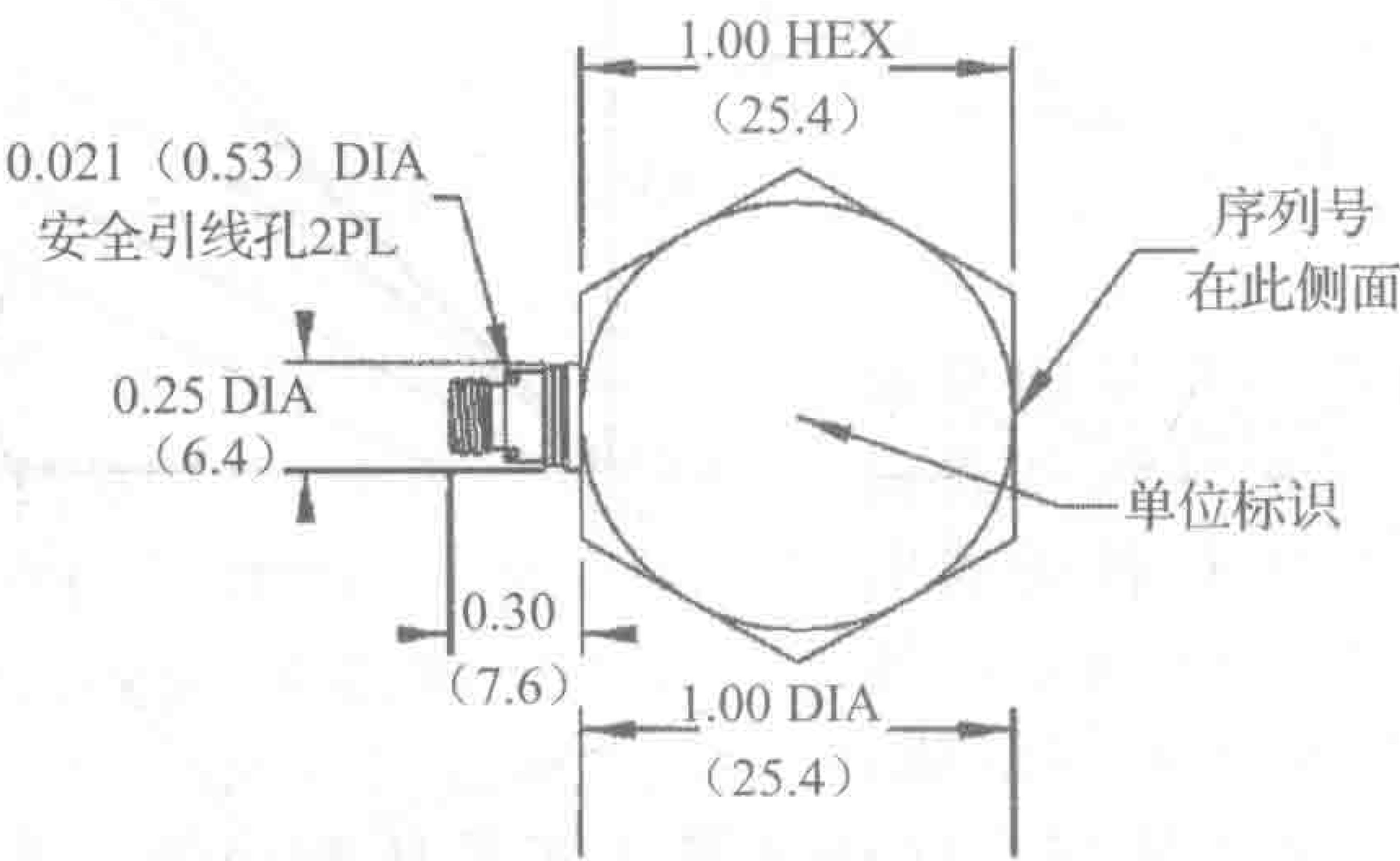
压电晶体的简单等效电路如图 9-51 所示，压电晶体等效为一个电容和电荷源，这个电荷源产生一个跨电容极板并与晶体变形成正比的电荷 q。利用戴维南等效电路表示加速度计(见图 9-52)，开路电压 V 等于电荷(通常在微微库伦量级)除以电容(典型值在微微法拉量级)：

$$V = \frac{q}{C_p} \tag{9-79}$$



a）示意图





b）实际装置

图 9-50　压电式加速度计结构(资料来源：美国恩德福克公司)

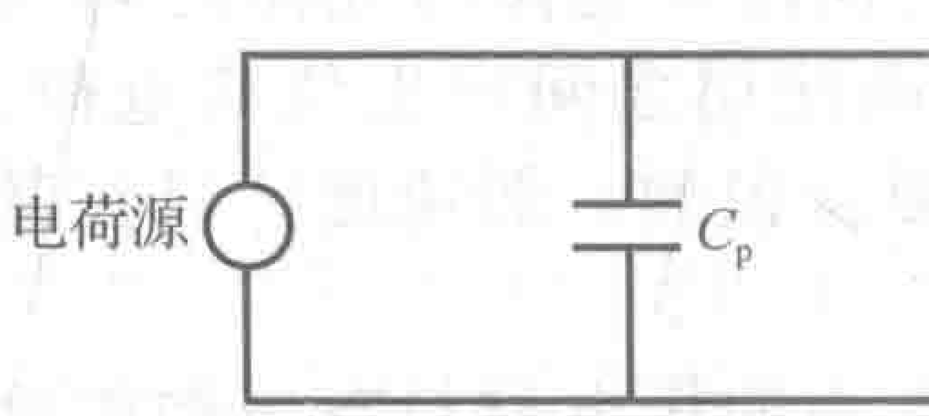


图 9-51　压电晶体等效电路

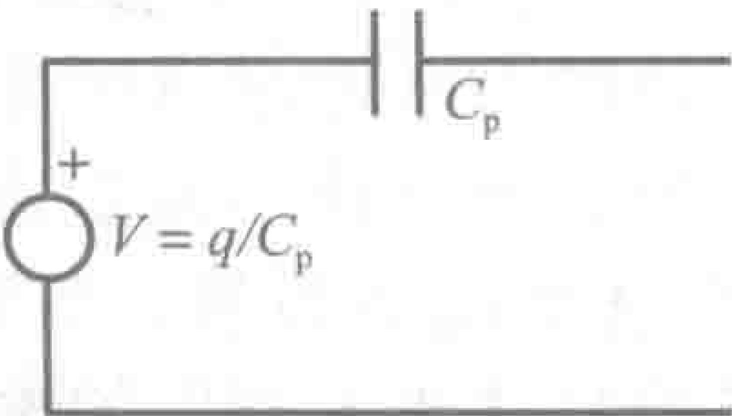


图 9-52　压电晶体戴维南等效电路

加速度计的灵敏度是电荷输出与壳体加速度的比值，表示为 pC/g，(有效值 pC)/g 或(峰值 pC)/g，其中 g 是重力加速度。加速度计的输出连接到**电荷放大器**上，将晶体上的位移电荷转换成可以测量的电压。大多数加速度计采用特定的电荷放大器，灵敏度标定单位为 mV/g。

在一般情况下，压电式加速度计不能测量恒定或缓慢变化的加速度，因为晶体只能通过测量应变的变化来测量力的变化。但对于振动和冲击等动态测量效果极好。低频处的响应进一步受到电荷放大器上低频截止频率的限制，大约为几赫兹。高频处的响应是加速度计的机械特性函数。加速度计的动态范围从几赫兹到几千赫兹的范围，它是加速度计谐振

频率的一部分：

$$f_{\mathrm{n}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{9-80}$$

压电式加速度计的典型频率响应曲线如图 9-53 所示。

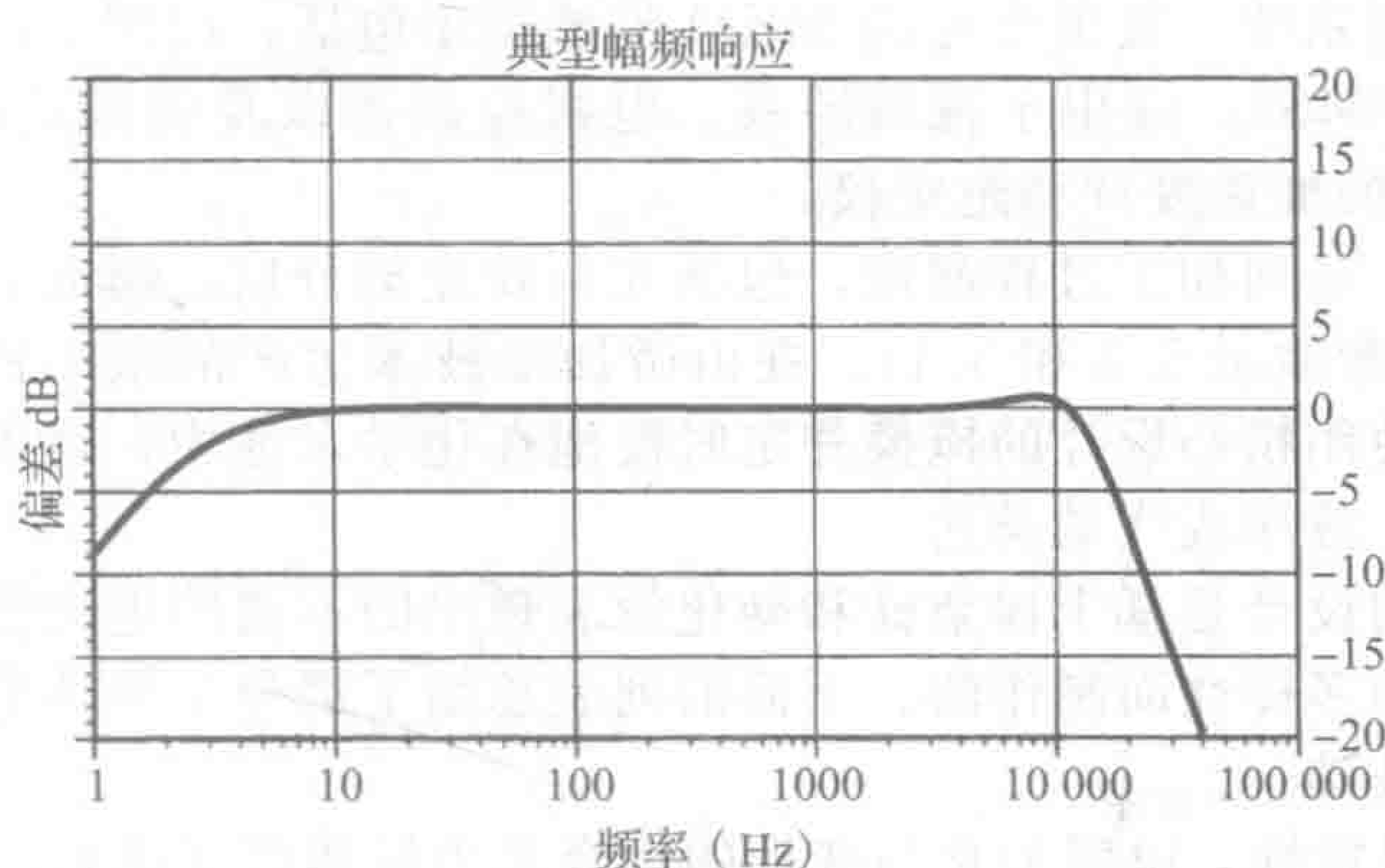


图 9-53 压电式加速度计的频率响应（资料来源：美国恩德福克公司）

实验练习 14 探讨如何使用加速度计监测旋转设备的振动。通过监测振动信号的频谱来确定系统中轴承的健康状况，这就是所谓的轴承特征分析。视频演示 9.14 显示了实验操作，网络链接 9.5 和 9.6 指出了一些实例结果。滚动轴承的划痕和磨损在振动频谱中产生更多的高频成分。

课堂讨论项目 9.14 压电声音

压电传声器是如何工作的？压电蜂鸣器是怎么工作的？

9.6 压力和流量测量

大多数测量压力的技术都要测量位移或变形，并根据校准或理论关系建立其与压力的联系。一种压力传感器是压力计，它通过检测重力场中的流体位移来测量静态压力或压力差。另一种类型是弹性膜片、波纹管或电子管，其弹性构件的变形量与压力相关。另一种是压电式压力传感器，压电晶体在所施加的压力作用下变形，从而可以测量动态压力。本章结尾部分罗列了这些技术的参考文献。网络链接 9.7 也有这些技术的详细资料。

目前也存在许多测量气体和液体流速的技术。皮托管用于测量流体静压和总压力之间的差异。文氏管和孔板流量计是基于测量流过障碍物流体的压降来测量的。涡轮流量计通过测量叶轮在流体中的旋转速率来检测流量。科里奥利流量计通过一个旋转振动的 U 形管测量质量流速。热线风速仪能检测热载流导线中的电阻变化。导线的温度和电阻取决于传送给移动流体的热量。传热系数是流量的函数。激光多普勒测速仪（LDV）从悬浮在流体中的颗粒中检测激光散射的频移。大多数流体力学教科书给出了各种流量测量技术的理论基础。本章结尾部分罗列了相关的参考文献。网络链接 9.8 也有这些技术的详细资料。

9.7 半导体传感器和微机电装置

半导体电子设计与制造的发展改变了我们对电信号的处理方式。许多为生产集成电路而开发的技术用于新型半导体传感器和执行器［即**微机电（MEM）装置**］的设计。1980 年，

MEM传感器研发出来，它使用集成电路技术来蚀刻硅以此生产出对加速度信号进行响应的装置。它由一个带有集成半导体应变计的微型硅悬臂梁组成。在惯性作用下，加速度可以使悬臂梁发生偏转，这样应变计就可以表征加速度的大小。基于早期开发的修改半导体电子硅的方法，应变计和悬臂梁可以在同一硅片上蚀刻。现如今MEM加速度计广泛应用于汽车安全气囊控制系统。其他常见的MEM传感器还包括：应用于汽车轮胎压力监测系统的压力传感器(TPMS)；应用于视频游戏、电视控制器以及便携式电子设备(如智能手机、照相机)等方面的加速度计和陀螺仪。

集成电路通过一系列加工过程制成，包括光刻胶光刻分层、曝光、化学蚀刻控制、气相沉积、掺杂(见视频演示5.3和5.4)。在由微加工技术生产的微小机械装置中，化学蚀刻过程非常重要。使用精心设计的掩模并定时浸泡在化学水池中，可形成加速度计的微型版本、静电电动机、液压或气动马达。

半导体传感器的设计是基于掺杂硅和砷化镓表现出的不同的电磁特性和在不同的物理环境中半导体功能的多样性而制作的。下面的列表总结了部分半导体的特性，这是不同类型半导体MEM的基础：

- 掺杂硅的压阻特性，电阻变化与变形的耦合是半导体应变仪和压力传感器的基础。
- 掺杂硅的磁特性，主要是霍尔效应，它是半导体磁晶体管的基础，其集电极电流可以由外部磁场调制。
- 由电磁波和核辐射在半导体中引起的电场效应，它是形成光颜色传感器和其他辐射探测器的基础。
- 半导体的热特性是热敏电阻、热导传感器、湿度传感器和温度传感器IC的基础。

表面声波(SAW)器件是一类重要的MEM传感器。SAW器件由一个表面沉积金属图案光刻的扁平压电衬底组成。这些模式形成叉指换能器(IDT)和光栅反射耦合器，如图9-54所示。一个叉指换能器的输入信号会在压电衬底上激发变形并产生表面传播的声波。相反，一个表面声波也可以在IDT产生一个输出电压。

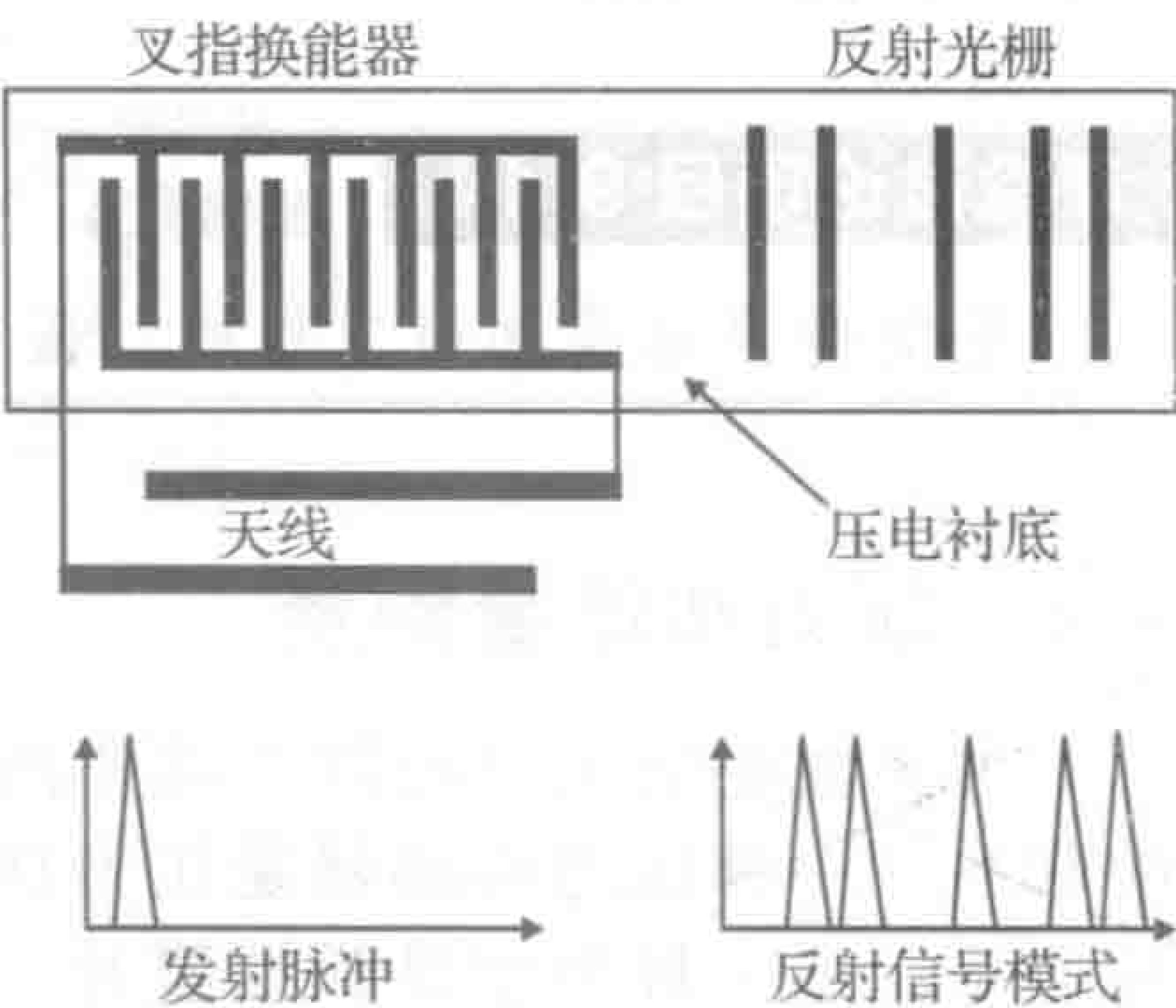


图 9-54

图9-54所示为SAW器件一个常规应用：无线识别系统。发射机通过天线发射由无源SAW器件接收的脉冲。由此产生的表面波在反射光栅间隔中作为唯一的脉冲形式被反射。脉冲通过相同的天线回传识至接收器，并进行识别。该装置常用于高速公路自动收费站中，通过收发器识别车辆。

SAW器件的其他应用包括延迟线、频率滤波器和各种传感器。它们的功能取决于衬底SAW的传播与共振、叉指换能器和反射光栅的模式与间距。

随着如此众多半导体传感器的发展，工程师已经开始将传感器和信号处理电路集成在混合电路中，它包含变送器、A-D转换器、可编程存储器和微处理器。完整的封装包提供了一个**微测量系统**(MMS)，相比离散的测量系统，它更小、更准确和更便宜。分布式微测量系统在未来的机电一体化系统设计中会有越来越多的应用。

问题和练习

9.1 绘制图9-4所示的每个开关的原理图。

9.2 展示一个有5V电源和电阻的单刀双掷开关怎样连线，才能提供一个数字信号，此信号在开关打开时为低，关闭时为高。

9.3 展示一个具有5V电源和电阻的常开按钮开关怎样连线，才能提供一个负逻辑(低电平有效)复位信号到微处理器。只有当按钮被按住时，信号才变为低。

9.4 画一个双刀双掷开关的原理图，显示如何连线才能切换两个独立电路的通断。

9.5 对课堂讨论项目9.1进行完整彻底的回答。

9.6 对课堂讨论项目9.2进行完整彻底的回答。

9.7 对课堂讨论项目9.3进行完整彻底的回答。

9.8 假设你用的是劣质的4位自然二进制编码的绝对式编码器，当编码器从代码3转到代码4时仔细观察，编码器输出几个不同和错误的值。如果光电传感器和码盘之间未对准，则在编码3至4转换期间可能会产生什么样的代码？

9.9 对课堂讨论项目9.4进行完整彻底的回答。

9.10 如果编码盘有1000条径向线，那么有2倍正交解码电路的二通道增量式编码器的角分辨率是多少？

9.11 写一个PicBasic程序以实现图9-18所示的功能。

9.12 对课堂讨论项目9.5进行完整彻底的回答。

9.13 使用圆形导体代替矩形导体，推导式(9-9)。

9.14 一种新的实验应变计安装在一个直径为0.25in(1in=0.0254m)钢棒的轴向方向上。钢棒具有120Ω的测量电阻，当钢棒加载500lb(1lb=0.453 592 37kg)的拉力时，钢棒电阻增加0.01Ω，钢棒应变因子是多少？

9.15 对课堂讨论项目9.8进行完整彻底的回答。

9.16 一个钢棒的弹性模量为200GPa，直径为10mm，并且在轴向加载50kN的拉力。如果应变因子是2.115的应变计和120Ω的电阻安装在钢棒的轴向上，从空载状态到变形状态，应变计电阻的变化是多少？如果应变计放置在一个惠斯顿电桥的一个支路(R_1)上，其他3条支路具有相同的基极电阻($R_2=R_3=R_4=120\Omega$)，根据励磁电压函数，求解在拉力状态下电桥的输出电压(V_{out})是多少？钢棒的应力是多少？

9.17 对课堂讨论项目9.10进行完整彻底的回答。

9.18 利用三引线连接和补偿应变计，绘制一个惠斯顿电桥电路的布线原理图。

9.19 为什么应变计电桥应用于负载单元消耗能量，当激励电压为10V时，比较在电桥电路中具有相等阻力臂的350Ω和120Ω应变计消耗的功率。如果加热成为一个问题，可以采用什么策略？这些策略有什么不足之处？

9.20 即使我们使用三线连接一个应变计以减少端子线电阻随温度变化的影响，这时会有一个现象叫做端子线脱敏，如果端子线电阻的大小超过0.1%的标称电阻，会引起显著的误差。假设有22AWG引线(0.050Ω/m)和一个标准120Ω量具，引线多久才会端子线脱敏？

9.21 通过评估或绘制多项式函数。寻找J型热电偶近似灵敏度(mV/℃)。

9.22 通过评估或绘制多项式函数。寻找T型热电偶近似灵敏度(mV/℃)。

9.23 如果一个J型热电偶应用在具有0℃参考温度的标准双结热电偶结构(见图9-42)中，200℃的输入温度将产生多大电压？

9.24 如果一个J型热电偶应用在具有100℃参考温度的标准双结热电偶结构(见图9-42)中，多大的测量温度将对应30mV的测量电压？

9.25 如果参考温度是11℃而不是100℃，且其他条件一致，怎样解决问题9.24。

9.26 使用具有参考温度固定为0℃的J型热电偶，如果测量温度的变化范围为10～20℃，则电压变化将是多少？

9.27 推导式(9-67)。

9.28 设计一个具有50g振动体，500N/m弹簧系数和30N·s/m阻尼系数的加速度计。如果加速度计安装到一个产生位移的物体上，$x_m(t)=5\sin(100t)$mm，解决下面的问题：

a. 物体的实际加速度振幅。

b. 加速度计的振动体与壳体之间的稳态相对位移的振幅。

c. 由加速度计测取的加速度振幅。

d. 振动体相对于壳体的时间函数$x_r(t)$的稳态相对位移的表达式。

9.29 设计一个振动体质量为1kg，2N/m螺旋弹簧常数和2N·s/m阻尼常数缓冲器的弹簧-质量-阻尼测振仪，给定$x_m(t)=10\sin(1.25t)$mm的目标输入位移，确定振动体稳态位移的表达式。

参考文献

Beckwith, T., Marangoni, R., and Lienhard, J., *Mechanical Measurements,* 5th Edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 1993.

Burns, G., Scroger, M., and Strouse, G., "Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90," NIST Monograph 175, April 1993.

Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia, vol. 28, Omega Engineering, Stamford, CT, 1992.

Dally, J. and Riley, W., *Experimental Stress Analysis,* 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.

Doeblin, E., *Measurement Systems Application and Design,* 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 1990.

Figliola, R. and Beasley, D., *Theory and Design for Mechanical Measurements,* 2nd Edition, John Wiley, New York, 1995.

Gardner, J., *Microsensors: Principles and Applications,* John Wiley, New York, 1994.

Hauptmann, P., *Sensors, Principles and Applications,* Carl Hanser Verlag, 1991.

Holman, J., *Experimental Methods for Engineers,* 6th Edition, McGraw-Hill, New York, 1994.

Janna, W., *Introduction to Fluid Mechanics,* Brooks/Cole Engineering Division, Monterey, CA, 1983.

Kovacs, G., *Micromachined Transducers Sourcebook,* WCB/McGraw-Hill, New York, 1998.

Measurements Group Education Division, "Strain Gage Based Transducers: Their Design and Construction," Measurements Group, Raleigh, NC, 1988.

Measurements Group Education Division, "Student Manual for Strain Gage Technology," Measurements Group, Raleigh, NC, 1991.

Miu, D., *Mechatronics: Electromechanics and Contromechanics,* Springer-Verlag, New York, 1993.

Pallas-Areny, R. and Webster, J., *Sensors and Signal Conditioning,* John Wiley, New York, 1991.

Proceedings of the Sixth UK Mechatronics Forum International Conference, C5—Novel Sensors and Actuators session, Skovde, Sweden, 1998.

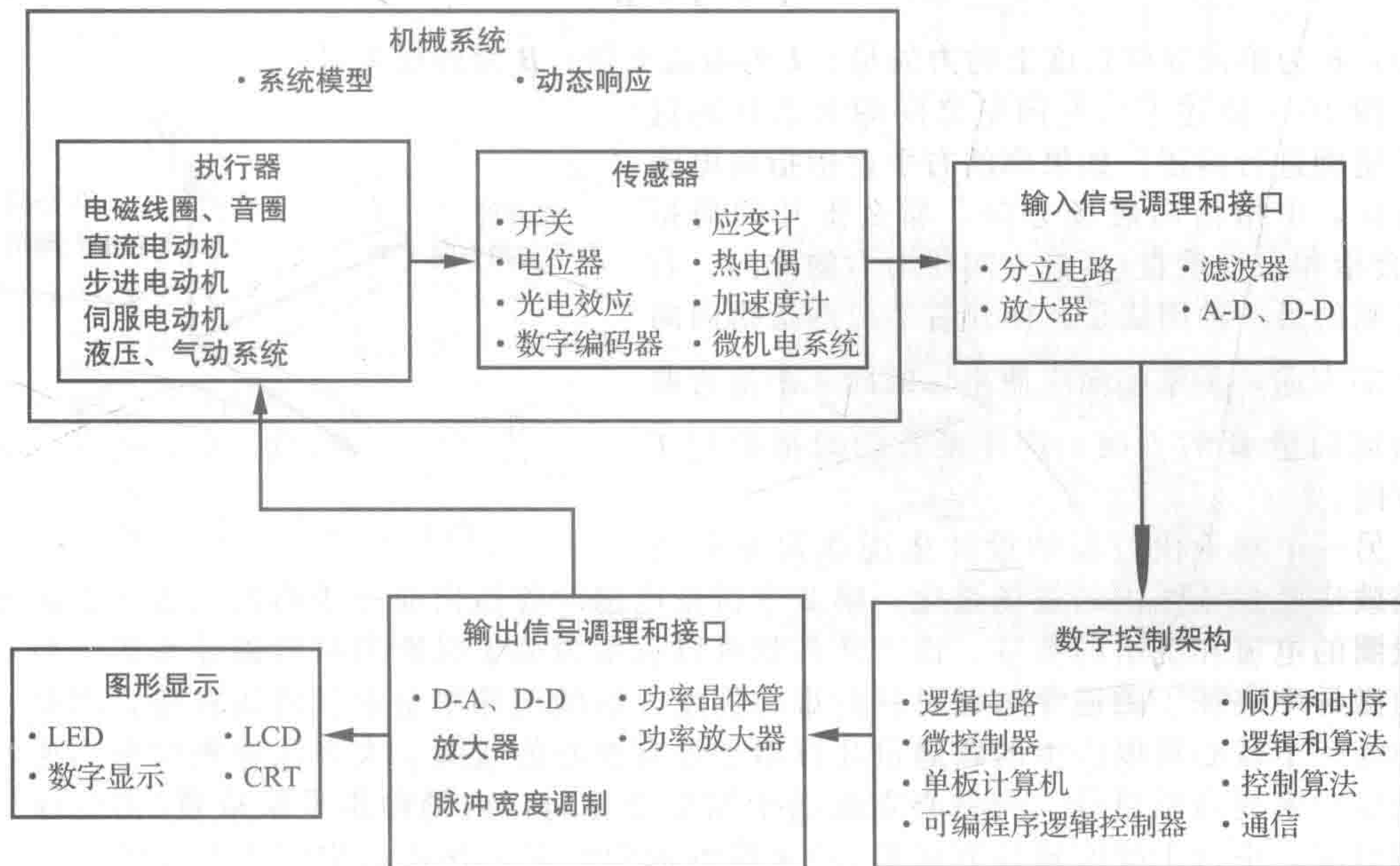
Sze, S., *Semiconductor Sensors,* John Wiley, New York, 1994.

Walton, J., *Engineering Design: From Art to Practice,* pp. 117–119, West Publishing, St. Paul, MN, 1991.

White, F., *Fluid Mechanics,* 7th Edition, McGraw-Hill, New York, 2010.

第10章 执行器

本章节将重点介绍在机电一体化系统设计过程中常见的众多执行器。



本章目标

当对本章内容阅读、讨论、研究及应用后，能够：

1. 识别不同类型的执行器，包括电磁线圈、直流电动机、交流电动机、液压元件及气动元件等；

2. 了解并掌握理解串励电动机、并励电动机、复励电动机、永磁式电动机及步进直流电动机；

3. 了解如何设计电子元器件以达到控制步进电动机的效果；

4. 选择一个应用于机电一体化系统中的电动机；

5. 识别和描述用于液压和气动系统的元器件。

10.1 引言

大多数机电一体化系统需要执行一系列运动或动作。这些运动或动作可以作用于任何物体，小至单个原子，大至铰接结构。这主要是由一个力或力矩的作用而导致加速度和位移产生的。**执行器**就是用于产生这种运动或动作的设备。

到目前为止，本书主要专注于电子元器件、传感器、相关的信号及信号处理。但上述实现的基础需要产生一个特定的机械动作或动作序列。传感器作为输入端，能够测量机电一体化系统的运动情况、开环或反馈控制以帮助调节运动，其他所学习到的电子元器件主要用于传递这些信息。执行器产生物理变化，如线位移和角位移。它们通常还能调整上述物理参数变化的速率和数值。因此，选择合适的执行器是机电一体化系统设计的一个重要方面。本章涵盖了一些最重要的执行器：电磁线圈、电动机、液压缸、旋转电动机及气动

缸。若把它诗意化，本章是“橡胶满足道路”。网络链接 10.1 提供了各种商用执行器和相关支持设备的供应商与在线网络资源。

10.2 电磁原理

电磁力是许多执行器产生运动的来源。当载流导体在磁场中移动，电磁力得以产生，其方向为垂直于电流和磁场的方向。**洛伦兹定律**主要用于表示作用于导体上的力、导体中流过的电流及外部磁场这三者之间的关系，其向量关系可以表达为

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \tag{10-1}$$

其中，$\vec{F}$ 为单位导体长度上的力矢量；$\vec{I}$ 为电流矢量；$\vec{B}$ 为磁场矢量。

图 10-1 描述了这些向量之间的关系并通过右手定则进行阐述。如果你的右手食指指向电流的方向，中指指向磁场方向，那么张开的拇指(与食指和中指垂直)所指方向即为力的方向。右手定则的另一种用法是：伸开右手，四指指向向量 $\vec{I}$ 的方向，手掌朝向应使得你的四个手指弯曲后指向向量 $\vec{B}$ 的方向，这样张开的拇指指向 $\vec{F}$ 的方向。

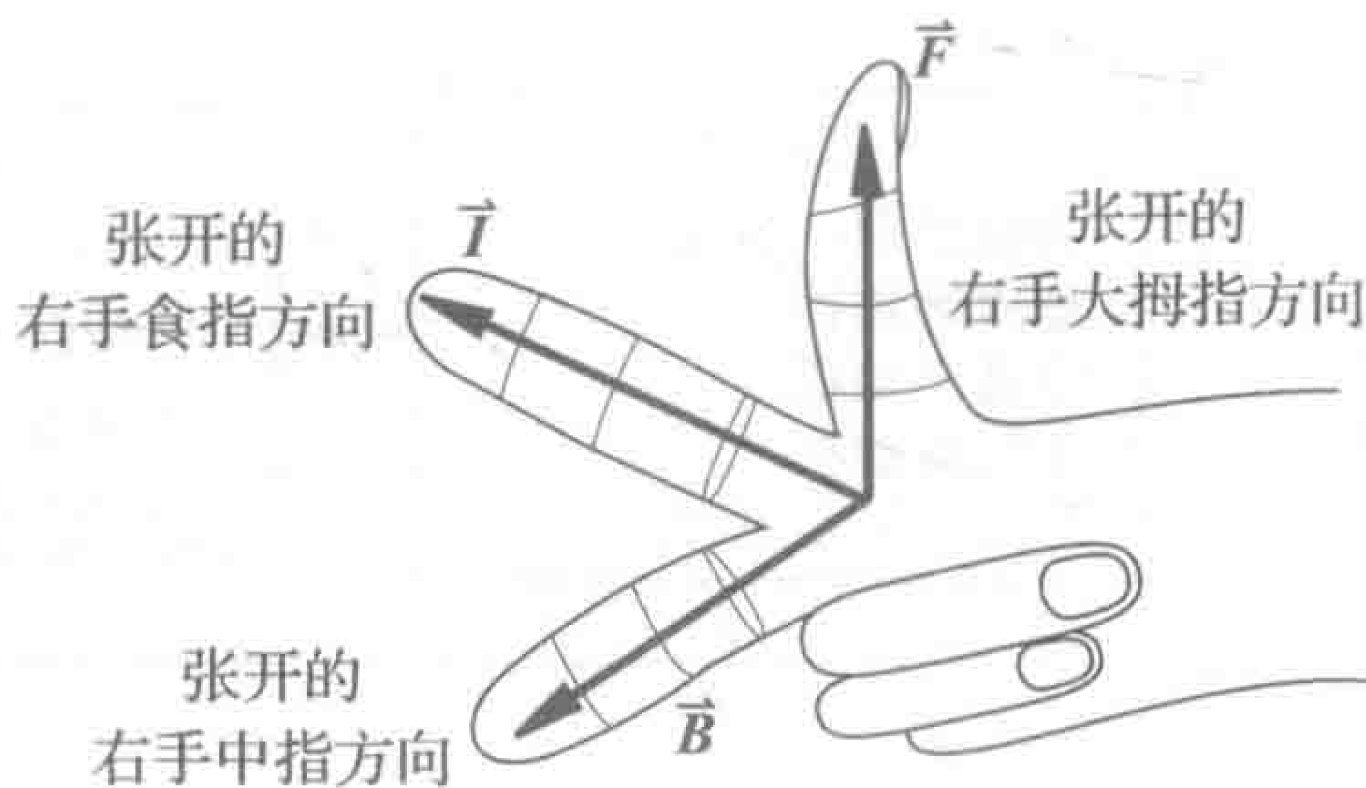


图 10-1 磁场力的右手定则

另一个对于执行器的设计来说非常重要的电磁效应就是线圈内的磁场强化。第 2 章讨论电感时曾指出通过线圈的磁通量正比于通过线圈的电流和绕组的数量。该比例常数可以表示为关于线圈内材料磁导率的函数。材料的磁导率表征了磁通穿透磁材料的难易程度。铁的磁导率是空气的数百倍，因此，线圈缠绕一个铁心可以产生的磁通量几百倍于没有铁心的线圈。大多数电磁设备都通过使用铁磁心来提高磁通量。当磁心在磁场中发生变化时，内核通常叠层放置(由绝缘层铁线圈组成，平行于线圈轴线方向堆叠)来降低涡流，它是在铁心中经历变化的磁场产生的。涡流可以通过法拉第感应定律来表示，它将会导致效率低下和不希望的磁心温度升高。

10.3 电磁线圈和继电器

如图 10-2 所示，**电磁线圈**由一个线圈和一个名为**电枢**的可动铁心组成。当线圈被电流激励时，通过关闭铁心之间的间隙来移动铁心可以提高磁链。移动心通常是由弹簧加载控制的，以使当电流关闭时它能够回缩。该弹力与电流的平方成正比，并与气隙宽度的平方成反比。电磁线圈价格不高，其应用基本局限于开关应用场合，如自锁、锁存和触发。它们常用于家用电器(如洗衣机)、汽车(如门锁和起动器)、弹球游戏机(如撞针杆和反弹球)及其化工业自动化中。视频演示 10.1 至 10.3 给出了创造性地应用电磁线圈的有趣的学生专题项目。

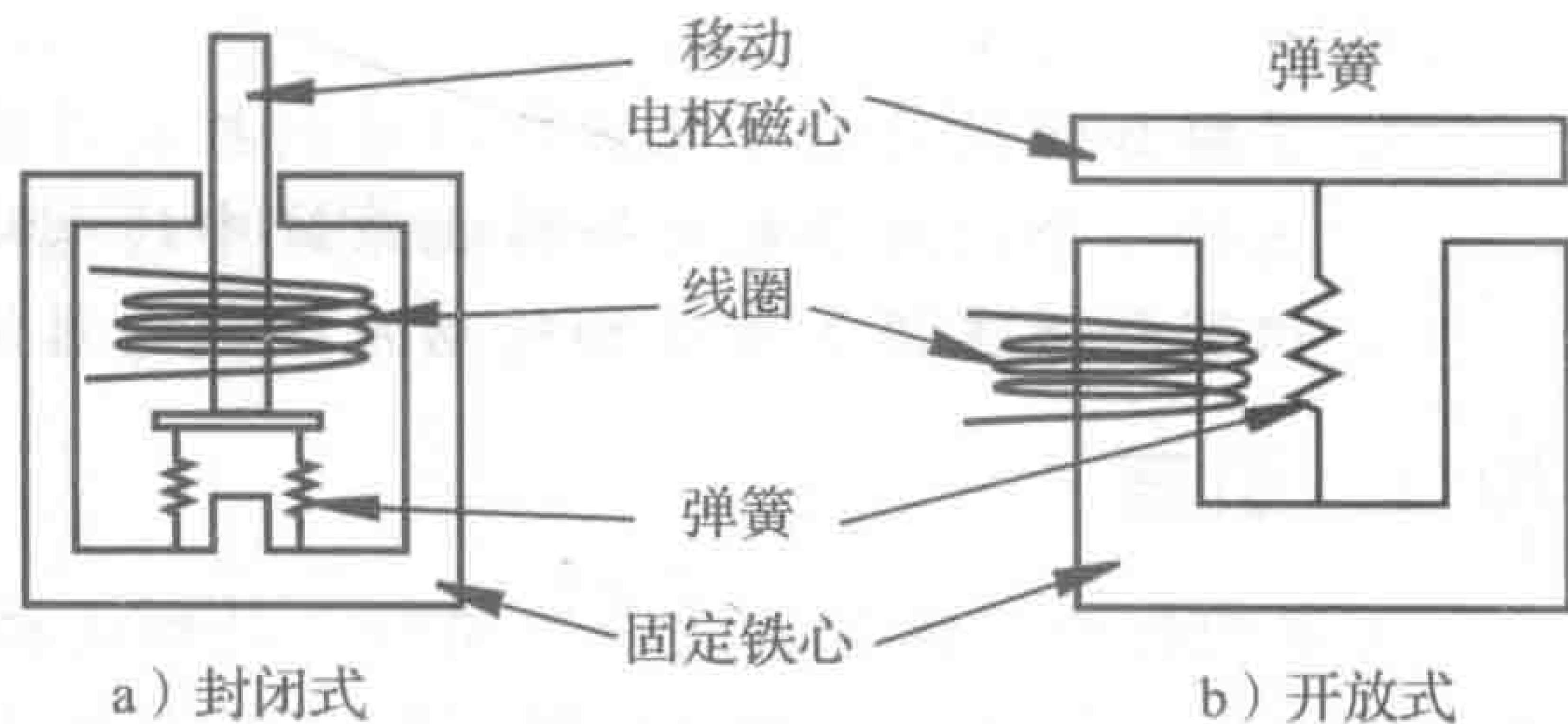


图 10-2 电磁线圈

机电**继电器**是一种用于实现电气触点间接触或断开的电磁线圈。通过给电磁线圈施加一个很小的输入电压即可通过延迟接触来完成一个较大电流的控制。该技术的应用包括功率开关和机电控制单元。继电器具有类似于功率晶体管切换开关电路的功能，但它能够实现对更大电流的开关。继电器可用于开关直流或交流电源，其原因在于它们可以创建一个

机械连接而无须电压偏置。另外，与共射极晶体管中输入与输出间存在公共地不同，继电器的输入电路与输出电路间是电气隔离的。因为继电器被电气隔离，所以输出电路中的噪声、感应电压及接地故障对输入电路的影响很小。继电器的一个缺点是它们的开关速度比晶体管慢得多。而且因为它们有接触和机械部件，因此磨损也更快。视频演示 10.4 展示了继电器和晶体管对不同开关速度的响应。

如图 10-3 所示，**音圈**由一个在永磁铁产生的磁场中运动的线圈组成，这个线圈被铁心强化。图 10-4 所示为商用音圈的线圈和铁心部分，音圈可以用作为传感器或执行器。当其作为执行器使用时，线圈上的力是直接与线圈中的电流成正比的。线圈通常连接到一个可移动的负载上，如音频扬声器的隔膜，液压比例阀的线轴或计算机磁盘驱动器的读写头。线性响应、小质量的动圈和其双向功能使得音圈在控制应用领域比电磁线圈更有吸引力。

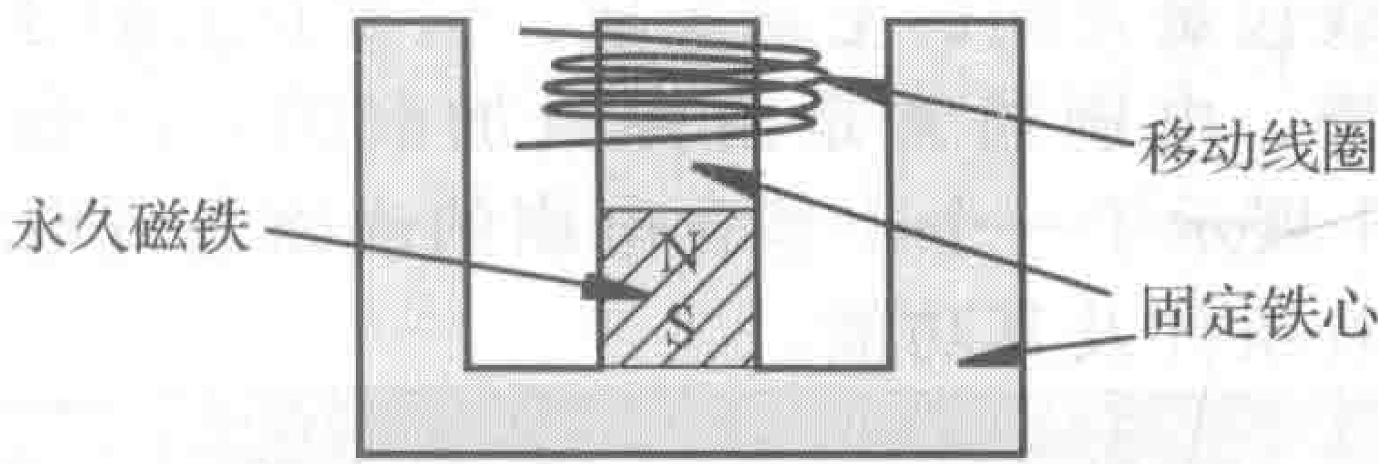


图 10-3 音圈

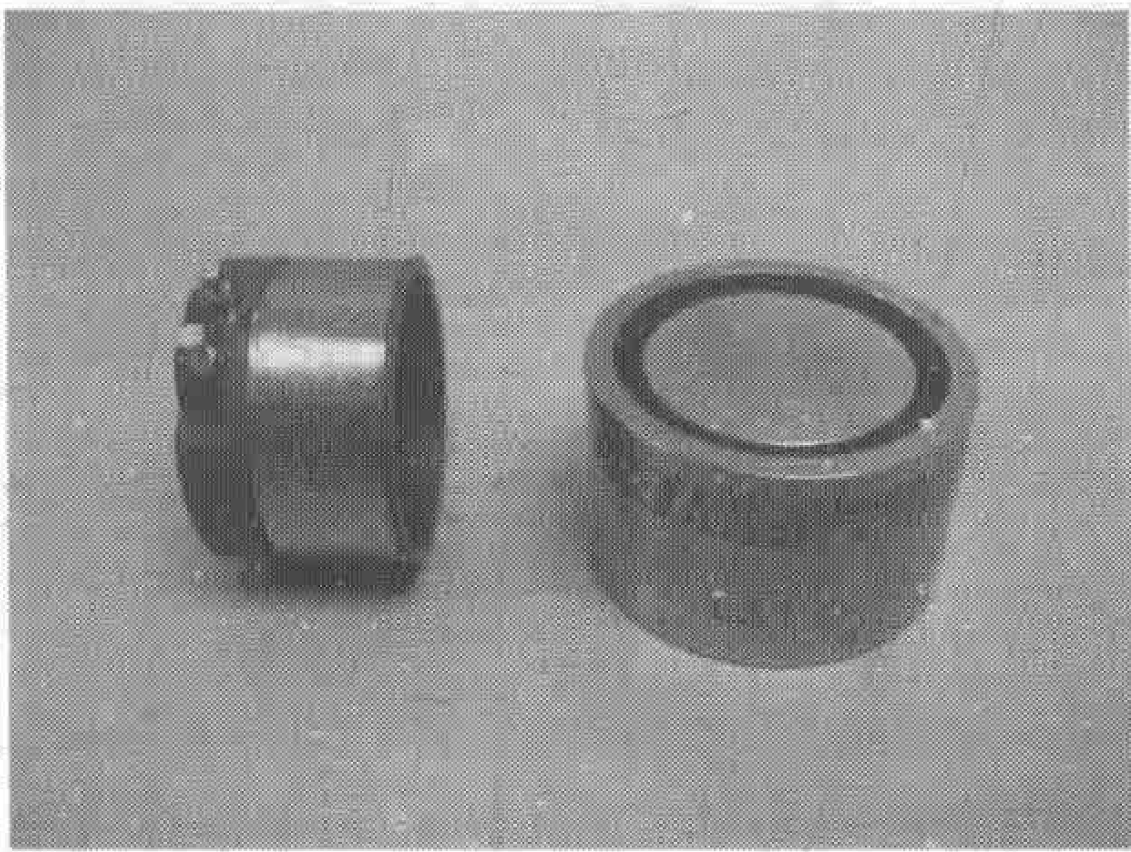


图 10-4 音圈的铁心和线圈

视频演示 10.5 和 10.6 显示了计算机磁盘驱动器的动作过程，音圈在此动作过程中是给读写头提供旋转运动的。视频演示 10.7 展示了一个超慢动作的演示过程，高速摄影机的拍摄生动地演示了音圈运动的准确性和速度。读写头在一个过程结束后及另一个过程开始前是相对静止的。而在实时的过程中(如视频演示 10.6)，这种运动则完全是模糊的。

课堂讨论项目 10.1 电磁线圈、音圈及继电器的案例

列出常见的包含电磁线圈、音圈、继电器的家居设备和汽车设备清单。描述这些特殊元件在你引用清单的各设备中被选用的原因。

10.4 电动机

电动机作为目前应用最普遍的执行器，几乎出现在所有的机电一体化系统中。电动机可通过功能或电气配置加以分类。若按其功能进行分类，电动机的名字就已经表明了它的功能。按照功能分类包括有转矩、齿轮、伺服、仪表伺服和步进电动机。然而，通常有必要在了解了电动机的电气设计后再对它在电力和控制位置领域的作用做出判断。图 10-5 提供了一个在机电一体化应用中电动机的配置分类，其差异源于电动机绕组和转子的设计，这会导致了各种各样的操作特征。电动机的使用广度随着性价比的持续改善而增加了。交流感应电动机在工业和大型消费设备中的应用尤为重要。事实上，交流感应电动机经常称为工业的主力。视频演示 10.8～10.10 展示了一些示例，描述了电动机的功能。

图 10-6 所示为一个典型电动机的结构和组件。称为**定子**的静止外壳支撑着径向磁极。这些磁极由称为**励磁线圈**的永久磁铁或线圈组成，这些线圈缠绕在铁心上。定子磁极的主要作用是提供径向磁场。由于存在磁导率，所以铁心会加强线圈内的磁场强度。对铁心加以分层的目的是减少由导电材料所产生的涡流的影响(见课堂讨论项目 10.2)。

同时，**转子**也是旋转电动机的一个重要组成部分。它由以下几个部分组成：一个由轴承支撑的旋转轴、通常称为**电枢绕组**的导电线圈及一个由绕组产生的加强磁场的铁心。在磁场作用的转子与定子之间通常有一个小的**气隙**。在许多**直流电动机**中，**换向器**也是转子的一个组成部分，它通过电枢绕组来传输和控制电流的方向。对于有换向器的电动机来说，“**电刷**”为移动式换向器的导电部分提供固定的电接触。早期电动机的电刷大多由铜线包裹弯曲的毛刷组成。但现在它们通常由石墨组成，能够提供更大的接触面积和自润滑。电刷通常是由弹簧加载的，以确保其与换向器间可以持续接触。视频演示10.11展示了一个小型含电刷的永磁直流电动机的拆卸过程，通过该视频可以看到电动机的各组件及其功能。

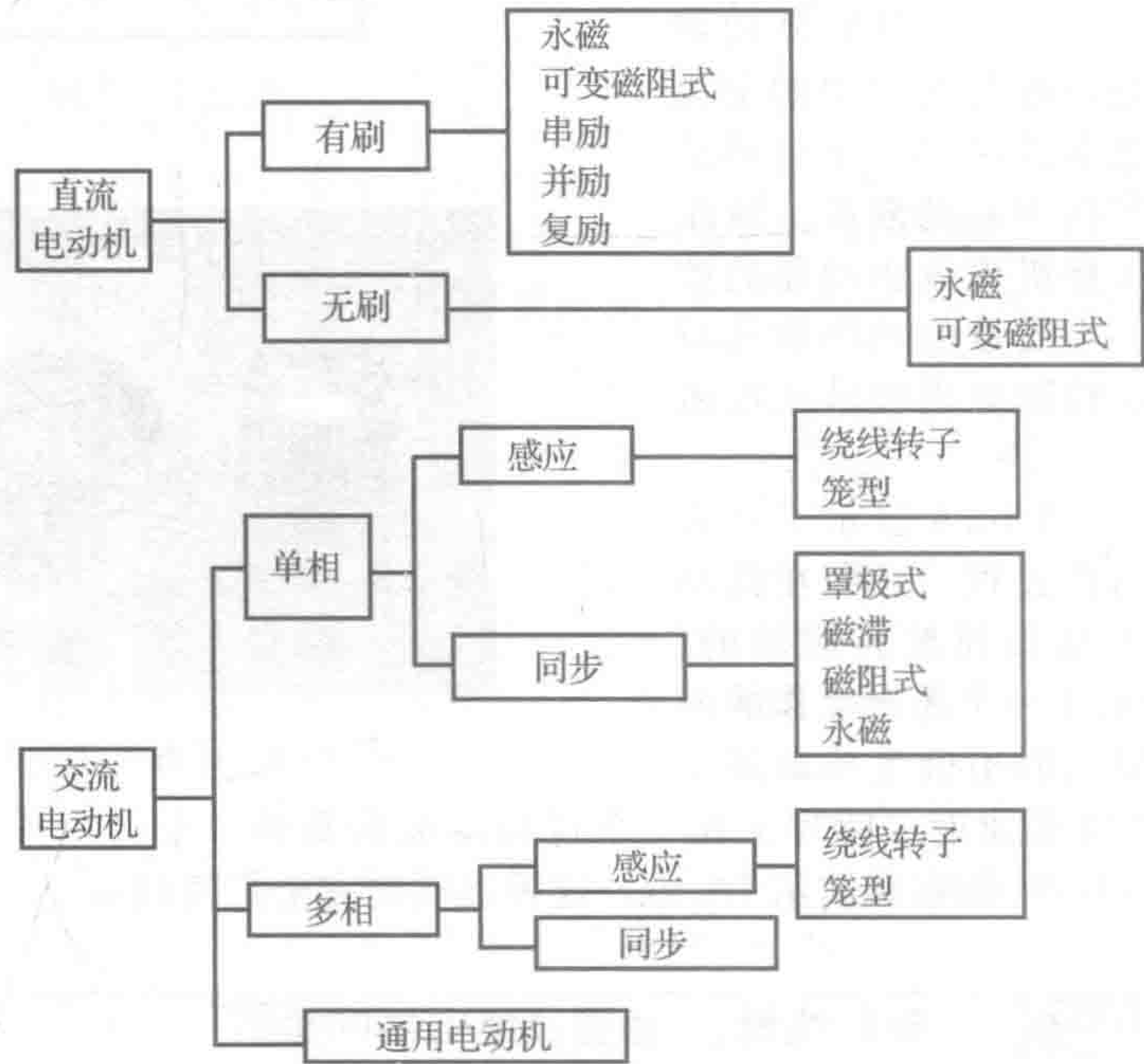


图 10-5　电动机配置分类

一个**无刷**直流电动机拥有永磁式转子，定子中有一个旋转的磁场。转子上的永久磁铁避免了对换向器的需要。相反，为了对旋转轴上的传感器做出响应，定子线圈中的直流电流是可以转换的。视频演示10.12和10.13演示了两个无刷直流电动机的例子。无刷电动机的一个优点是，它不需要维修更换刷子。另外，因为不存在转子绕组和铁心，所以转子惯量较小，有时更易控制。因为没有转子绕组，所以也不存在转子散热问题。没有电刷的另一个优点是没有机械换向产生的电弧。因此，无刷电动机产生更少的EMI和更适合应用于爆炸性气体环境中。无刷电动机的缺点之一是它们需要更多的传感器和控制电路。

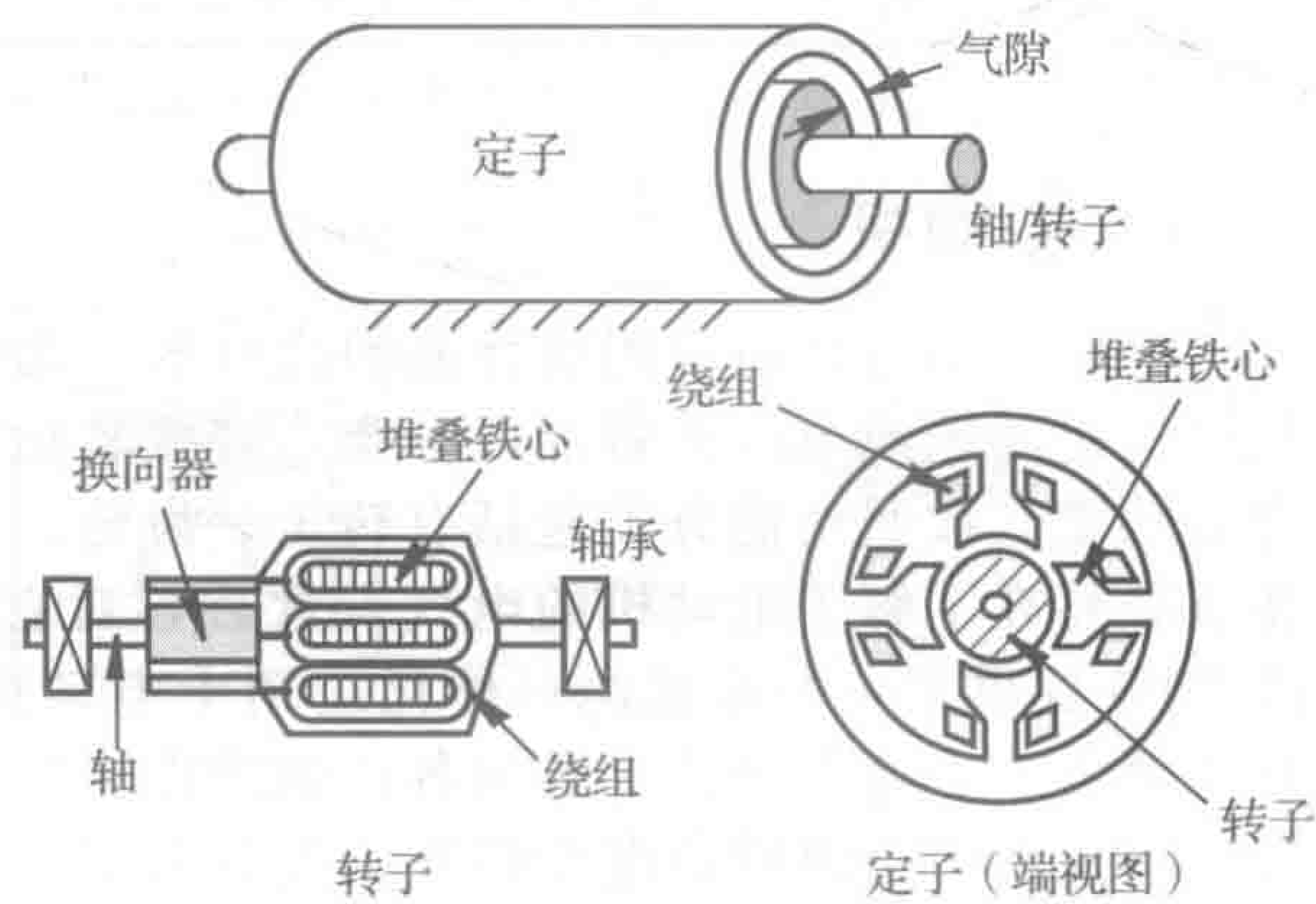


图 10-6　电动机的结构与标准术语

图10-7所示为商用组装电动机的例子。在图的上部，左边的电动机是一种含有齿轮减速装置的交流感应电动机。而右边的电动机两相步进式电动机。电动机通常有标准的尺

寸与标准的安装支架，因此它们通常也有包括电动机规格的铭牌。图的下部显示了一种永磁式步进电动机的内部结构。视频演示 10.14 展示了商用直流电动机和步进电动机的其他常规案例。

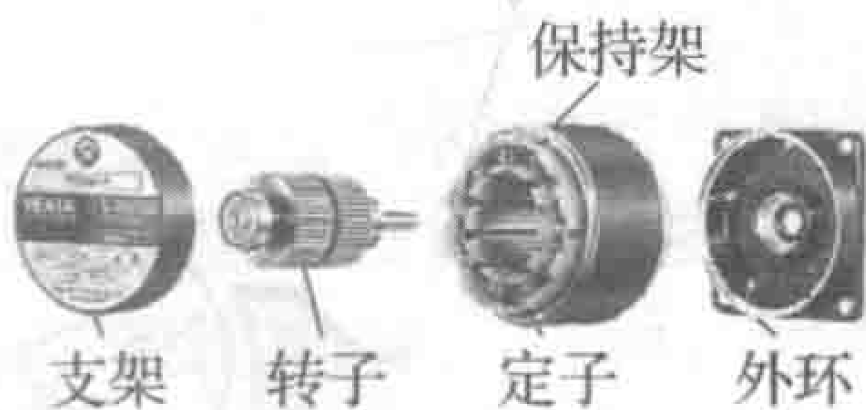
课堂讨论项目 10.2 涡流

描述导电材料在一个变化的磁场中产生感应涡流的原因。解释为什么电动机转子铁心通常是层压式的，且叠片最好的方向是什么？

转矩是电动机通过定子磁场和电枢电流或定子磁场间产生的。从一开始说明这两个原则。图 10-8 展示了一个含有 6 个电枢绕组的直流电动机，其绕组中的电流方向如图 10-8 所示。如式(10-1)所示，固定定子磁场与电枢绕组中电流的交互作用产生了一个逆时针方向的转矩。你可以通过应用右手定则中电枢电流和定子磁场的方向判断转矩的方向。为了保持转矩随着转子旋转，电枢电流的空间布置相对于定子磁场必须保持不变。而换向器主要是通过切换电枢绕组中的电流来实现正确的转子顺序的。



a）交流感应和步进电动机



b）带永磁转子的步进电动机

图 10-7 商用电机(资料来源：东方电机的分解图)

图 10-9 所示为换向器。它由一个交替导电的环和连接转子绕组的绝缘材料组成。电流通过电刷直接流过绕组，当电刷旋转时，它滑过换向器的表面。在位置的示例关系中，电流沿顺时针方向流过线圈 A、B 和 C，沿逆时针方向通过 D、E 和 F。

当转子从图示位置顺时针旋转 1/6 全周期时，绕组 C 和 F 中的电流切换方向。随着电刷向旋转换向器滑动，这个过程仍按顺序进行。当绕组拥有适当的配置时，换向器相对于固定的定子部分保持空间排列一致的电流。实施上述过程可以连续获得期望方向的转矩。

电动机产生转矩的另一种方法是利用定子和转子磁场的相互作用。转矩是由两个异名极磁场相互吸引产生的，而不是相互排斥。图 10-10 说明了一个简单两极直流电动机的工作原理。定子磁极通过永久磁铁或含直流电流的线圈产生固定磁场。转子绕组的转换将会导致磁场方向发生变化。而转子磁场的转变与固定定子区域的相互作用则会使轴上产生转矩，使其旋转。当转子位于位置(Ⅰ)时，右侧的电刷接触换向器 A 部分，而左侧的电刷接触换向器 B 部分，从而使转子绕组产生相应的电流，导致了图 10-10 所示的磁极。转子磁极反向于定子磁极，从而产生了一个使得转子顺时针运动的转矩。在位置(Ⅱ)时，定子磁极与转子磁极反向，并诱发转子磁极加速顺时针旋转。在位置(Ⅲ)和(Ⅴ)之间时，换向器的接触开关开始切换，转子电流的方向与磁场的方向随之发生改变。在位置(Ⅳ)时，电刷都会与换向器之间暂时脱离，但由于惯性转子会继续运动。在位置(Ⅴ)时，反向的转子磁场会与定子磁场方向相反，从而继续顺时针旋转和运动。

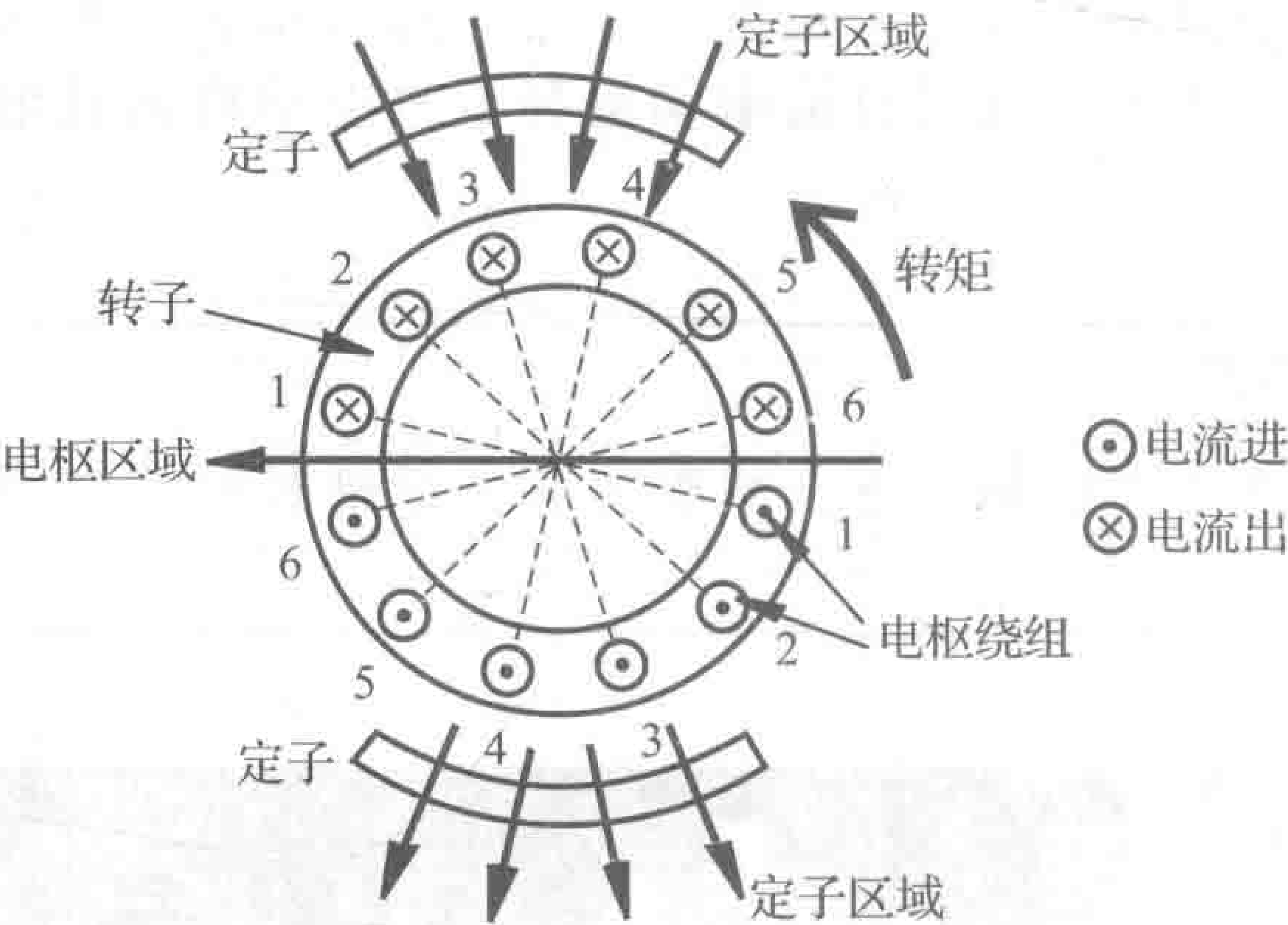


图 10-8　电机励磁电流的相互作用

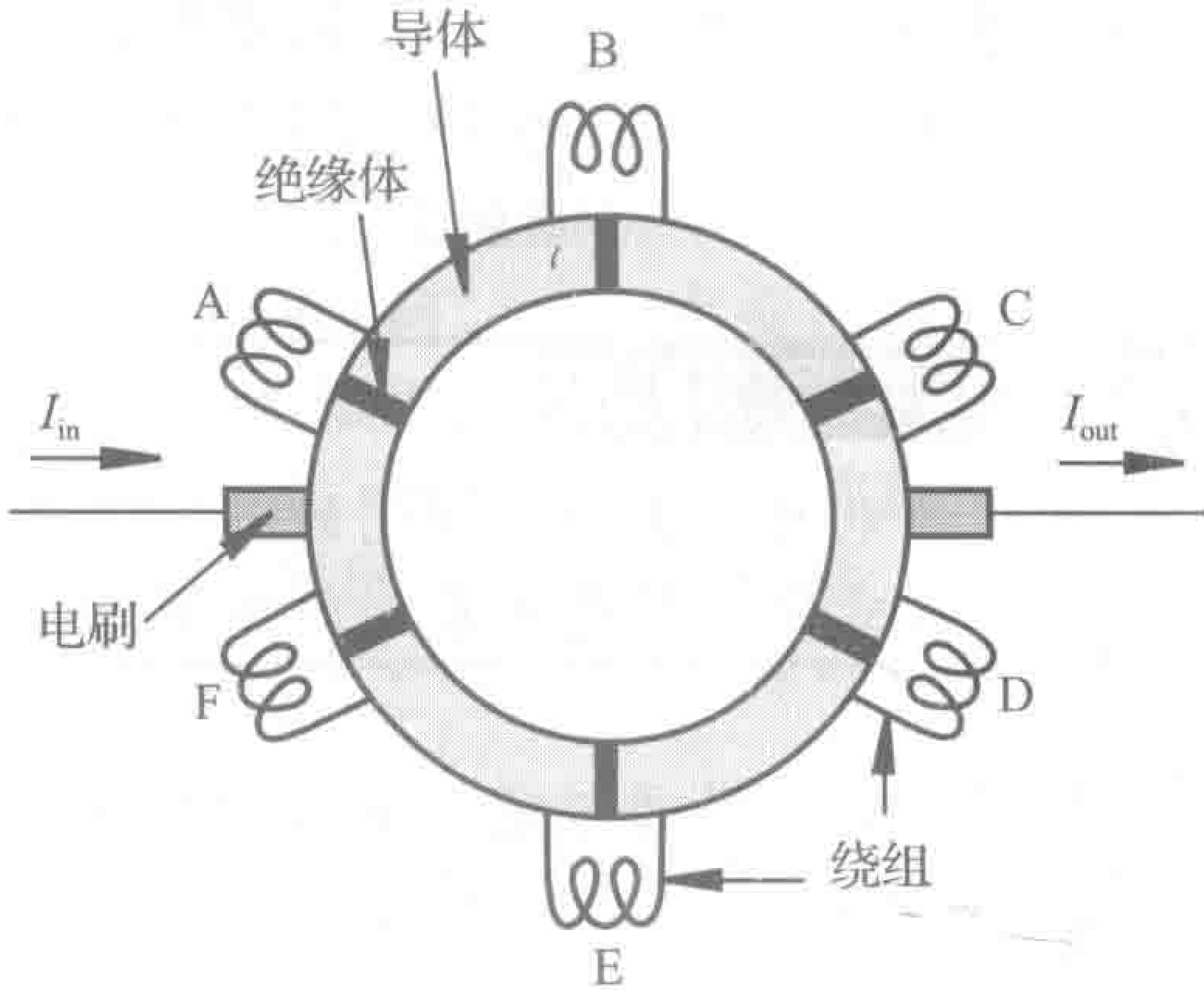


图 10-9　6 绕组换向器电动机

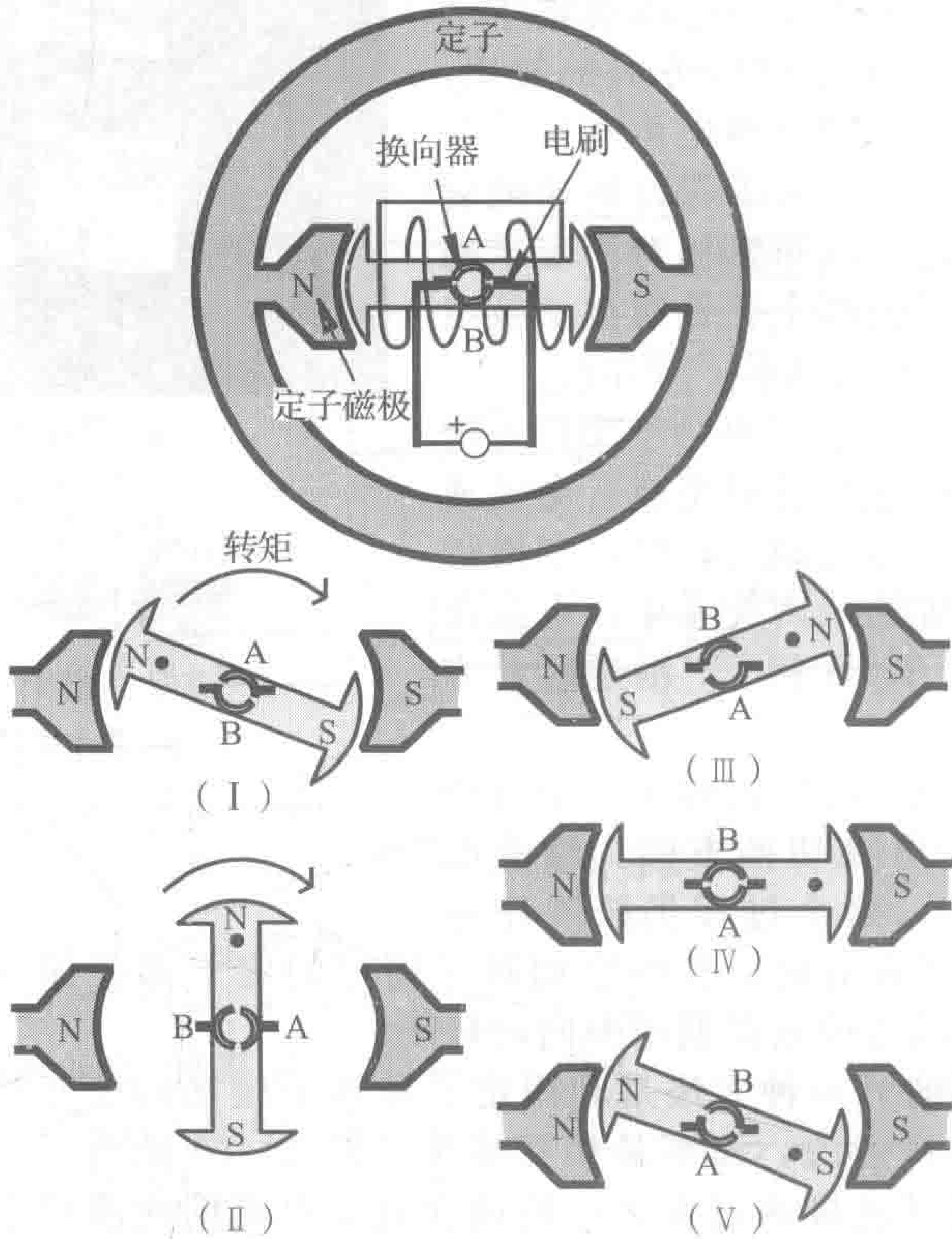


图 10-10　电动机的相互作用

课堂讨论项目 10.3　　**电动机电场间的相互作用**

图 10-8 中产生的电枢磁场对电动机转矩有什么影响?

图 10-10 所示为一个简单的两极电动机，当电动机处于(Ⅳ)位置时，它将会停止运动，此时电刷位于换位器间隙。但通过使电动机拥有更多电极或换向器重叠切换则可以避免上述问题的出现。这一办法可使电刷始终维持与两个活动极相接触，即使换向时也是如此(如视频演示 10.11 和课堂讨论项目 10.4 所示)。

其他没有通过这些简单模型讨论的问题是一个反电动势(emf)和感应。当转子绕组切

割定子磁场时，会产生一个与转子电压相反的**反电动势**。同样，当换向器开关切换电流方向时，会在与电流变化方向相反的方向上产生一个电压。

交流电动机的工作原理与磁场的相互作用相似，但不需要变送器。这是由于磁场围绕定子转动的，因此这一运动是由交流电压及线圈相对于定子的位置所决定的。**异步**交流电机的转子绕组没有外部电压，相反，由于在定子周围有旋转磁场，所以在转子绕组上存在感应电压。转子比起旋转的定子部分来说，转速较慢(称为转差)，这会出现感应现象。也正是因为这个动作，异步电动机有时称为**感应的机器**。同步交流电动机的转子绕组通常是由**集电环**组成的，而不是换向器。电刷能够提供与集电环间持续不断的接触，从而导致相关区域绕着转子绕组的转速与绕着定子的转速一致。也正是由于这些区域之间的相互作用，转子与定子区域的旋转速度相同，因此称为同步。

课堂讨论项目 10.4　　电动机结构剖析

购买和拆卸一个便宜的供电电压为1.5～3V的直流电动机(如无线电器材公司目录下的273-223)。熟悉电刷、换向器、电枢绕组、叠片转子磁极及永磁体。描述定子永久磁体所产生的磁场。对于不同的换向器位置，判断电枢绕组上的电流方向(及由此产生的磁场方向)。确定由电场和励磁电流交互作用所产生的转矩方向。你认为哪种影响是更强烈？

网络链接10.2提供了展示各种电动机基本原理、发电机及变压器功能的插图和动画。

10.5 直流电动机

直流电动机已在大量的机电设计中得到应用，其原因在于通过不同的电气配置可以获得所需的转矩-转速特性。在大多数情况下，直流电动机的速度是可以平滑控制的。也正是由于直流电动机具有较高的转子转动惯量，所以它们可以快速响应。同时，**动态制动**过程是将电动机所产生的能量作为电阻耗散器的一部分来**再生制动**的，它可将电动机所产生的能量回馈到直流电源，这样可在应用中实现所期望的快速停止和高效。

图10-11所示为一个典型的**转矩-转速曲线**，通过这一曲线可以看出电动机在额定电压下可以提供一个转矩并输出不同的转速。当给定一个额定转矩和额定电压时，电动机可以根据**电流-转矩**曲线来确定所需的电流值。一般的经验法则是：电动机在低速时输出一个较大的转矩，较大的转矩意味着有较大的电动机电流。**起动转矩**或**失速转矩** T_s 是电动机在零速度时可以产生的最大转矩，而这一转矩主要与电动机的起动或过载有关。**空载速度** ω_{max} 是电动机可以获得的最大转速。当电动机空载或没有转矩应用于电动机时，可获得这样的转速(即自由旋转)。

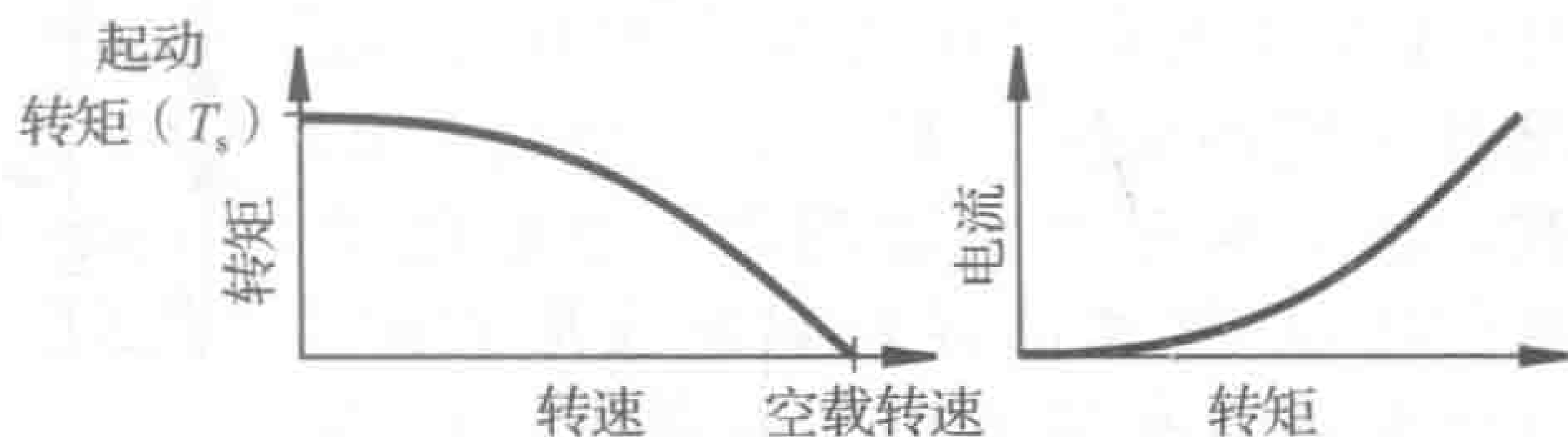


图10-11 电动机的转矩-转速曲线

根据定子磁场建立方式的不同，直流电动机分为四类：永磁电动机、并励电动机、串励电动机及复励电动机。图10-12～图10-15所示为不同分类的电动机原理图、转矩-转速曲线及电流-转矩曲线。其中，V 为直流电源电压，I_A 是转子绕组中的电流，I_F 是定子绕组中的电流，I_L 是直流电源供电的总负载电流。

永磁(PM)电动机的定子部分(见图10-12)是由永磁体组成的，因为永磁体不需要外部能量，因此不会产生热量。一个永磁电动机相对于其他的等效直流电动机来说更轻也更小，主要是由于高强度的永久磁场。永磁电动机可以通过切换电压的方向来实现反向运

转，其原因在于只有转子上的电流与磁场方向会发生改变。因为其具有线性的转矩-转速关系，所以永磁电动机可以被控制并得到应用。当执行器是线性时，相对来说控制器的设计是简单的，其原因在于分析系统可以大大简化。当电动机通过传感器反馈来控制其位置或速度时，则称其为伺服电动机。由于永磁电动机额定功率的最大值为 5hp(3728W)，因此它们通常应用于低功率的场合，以分马力评级更常见。永磁直流电动机可以是有刷、无刷或步进直流电动机。

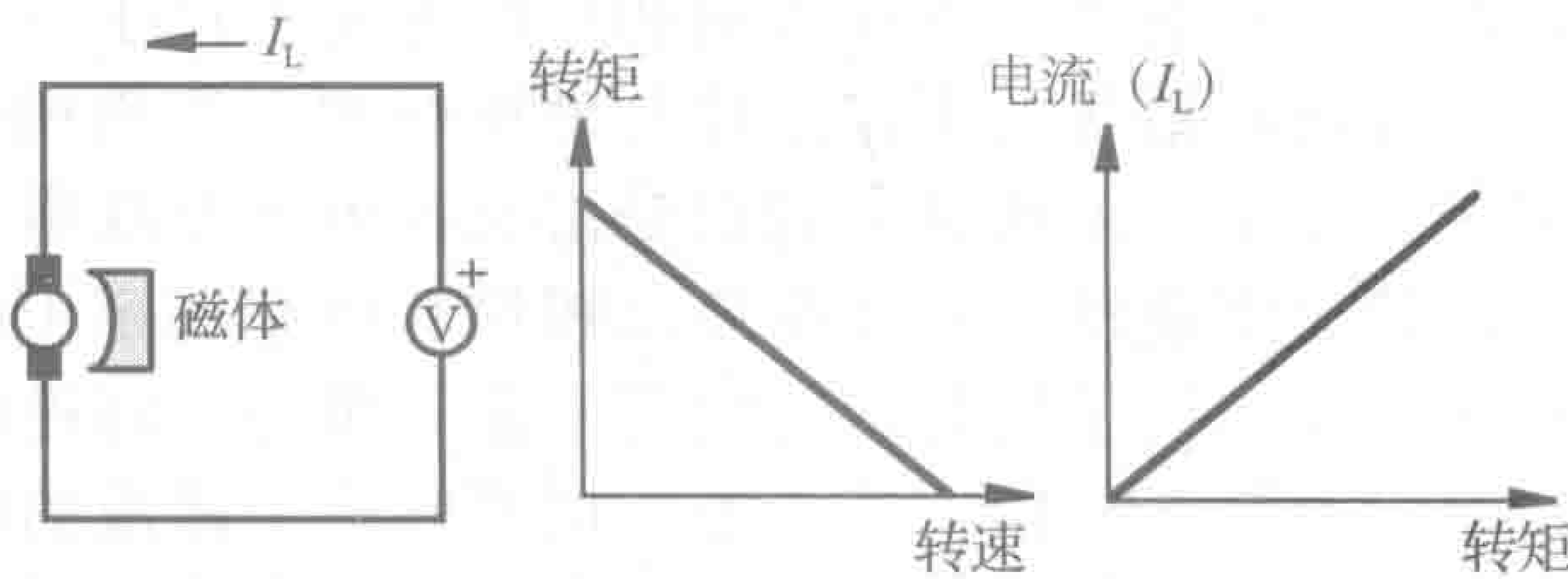


图 10-12 永磁直流电动机的原理图及转矩-转速曲线

并励电动机(见图 10-13)由相同电源驱动的电枢和励磁绕组并联组成。总负载电流是电枢和励磁绕组电流的总和。并励电动机在较大的加载范围下可以获得近似连续的速度。其起动转矩约为 1.5 倍额定转矩，它是直流电动机中拥有最低起动转矩的一类电动机。同时，它可以通过将电位器串联放置于励磁绕组中来进行调速。

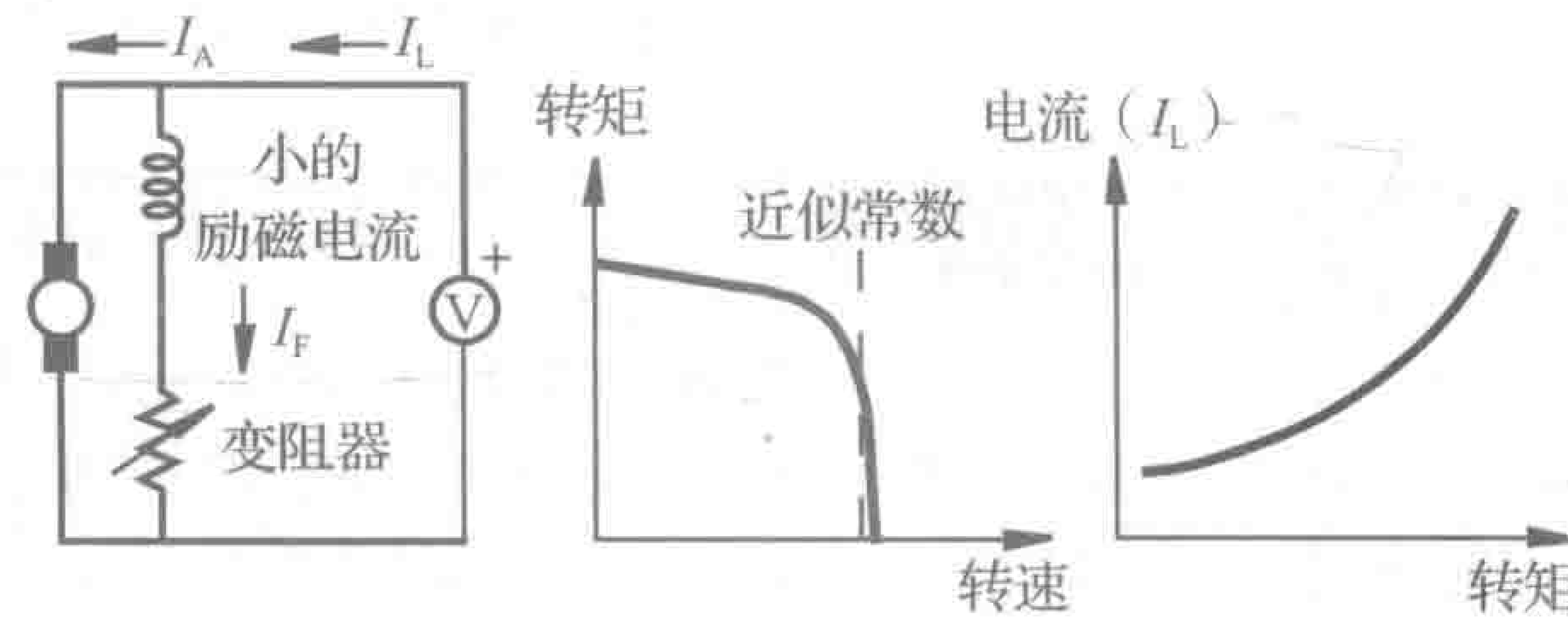


图 10-13 并励直流电动机的原理图及转矩-转速曲线

串励电动机(见图 10-14)由电枢和励磁绕组串联组成，所以电枢和励磁绕组中的电流是相等的。串励电动机需要很高的起动转矩，其输出转速主要取决于负载的大小，当为小负载时它的速度非常快。事实上，大型的串励电动机在突然卸载时可能会造成损坏(如在皮带传动中皮带会损坏)。这就是所谓的**失控**。只要电动机仍然加载，就不会存在上述问题。串励电动机的转矩-转速曲线是双曲线形式的，也就意味着在接近恒功率范围内转矩和速度间成反比关系。

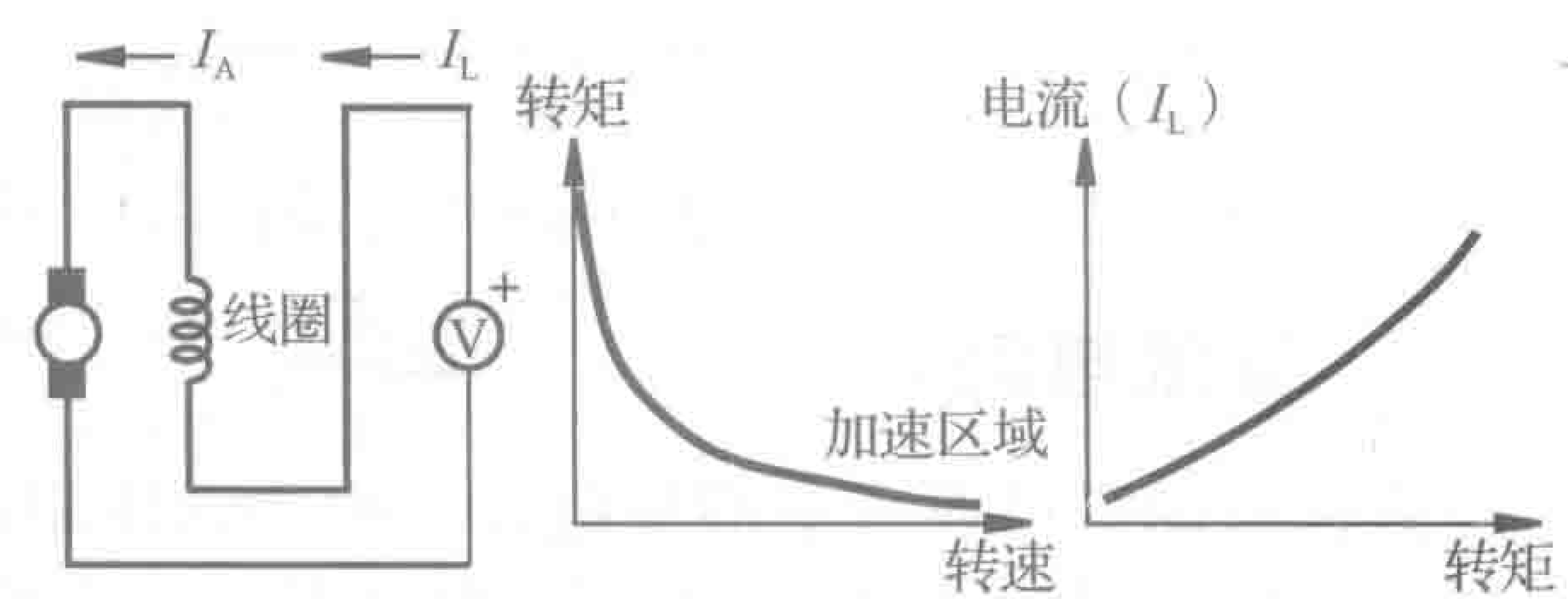


图 10-14 串励直流电动机的原理图及转矩-转速曲线

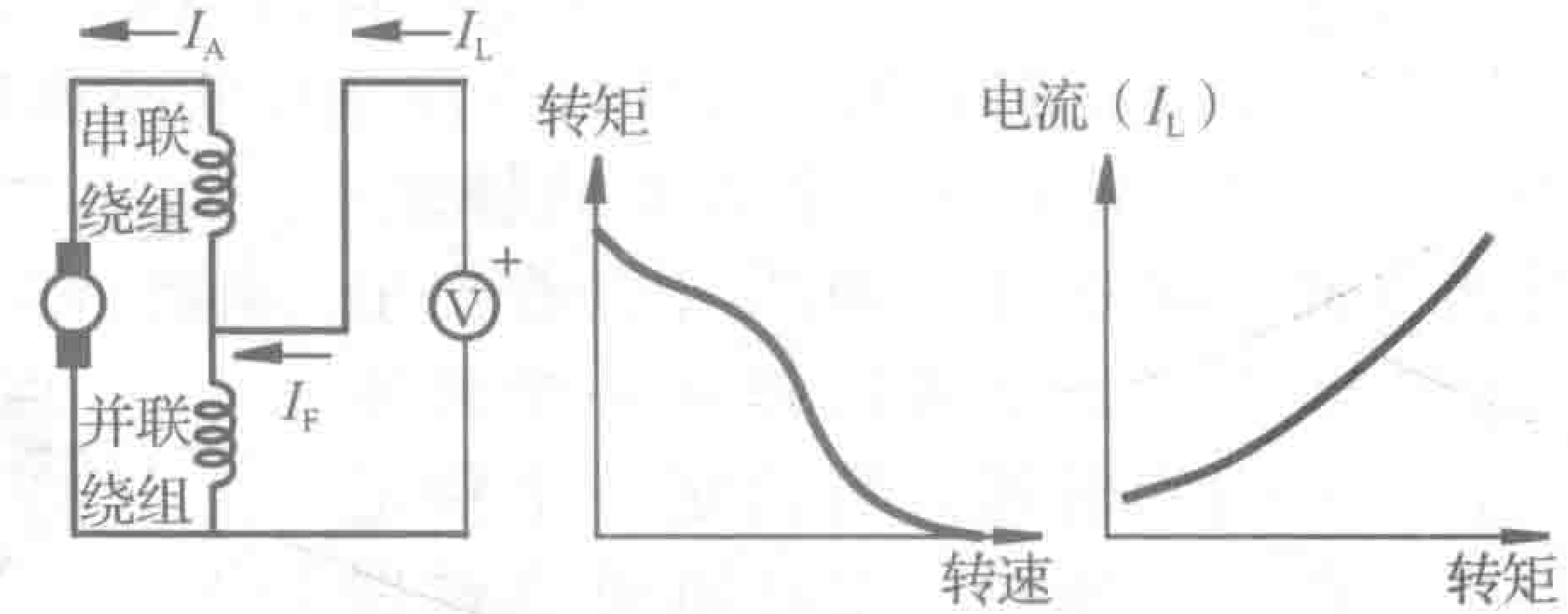


图 10-15 复励直流电动机原理图及转矩-转速曲线

复励电动机(如图 10-15 所示)包括并联和串联励磁绕组，因此它具有并励电动机与串励电动机的组合特征。部分负载电流通过电枢和串联绕组，而剩下的负载电流仅流过并联绕组。与串励电动机所不同的是，一个复励电动机的最大速度是有限的，但同时其调速性能不及并励电动机。复励电动机产生的转矩比相似尺寸的串励电动机所产生的转矩小。

同时值得注意的是，当并励、串励及复励直流电动机的电压极性发生改变时，它们的旋转方向不会发生改变(即这些电动机是不可反转的)，这点与永磁电动机是不同的。产生这一现象的原因在于励磁和电枢绕组受到相同能量的激励，定子和转子的极性会同时发生改变。

10.5.1 直流电动机的电气方程

如图 10-16 所示，直流电动机的电枢阻抗可以建模为电阻 R，然后将电感 L 及第二个电阻 R_L 并联之后再与 R 串联的关系。然而，随着导电电枢在定子产生的磁场中开始旋转，

电枢绕组中产生一个与外加电压反向的感应电压即**反电动势** V_{emf}。通常，反电动势与电动机的转速 ω 成正比，转速的单位为 rad/s：

$$V_{emf} = k_e \omega \tag{10-2}$$

其中，比例常数 k_e 为电动机的**电常数**。

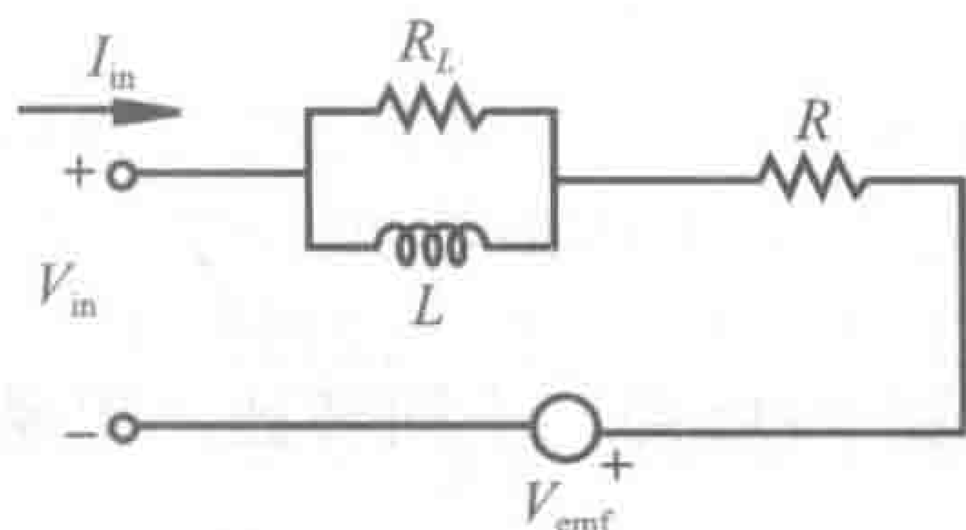


图 10-16 电动机电枢的等效电路

磁路中等效电阻损耗 R_L，通常比绕组电阻 R 大一个数量级，因此它是可以忽略。当假设 $R_L \approx \infty$ 时，若电枢电压为 V_{in} 及电枢电流为 I_{in}，电动机的电流方程可以表示为：

$$V_{in} = L\frac{dI_{in}}{dt} + RI_{in} + k_e \omega \tag{10-3}$$

10.5.2 永磁直流电动机的动态方程

由于永磁直流电动机的重要性及其分析和理解的简易性，所以应更详细地分析它的控制方程。由于定子磁场和电枢电流之间的相互作用，所以永磁直流电动机所产生的转矩与电枢电流成正比：

$$T = k_t I_{in} \tag{10-4}$$

其中，k_t 为电动机的**转矩常数**。永磁电动机的电常数 k_e 和转矩常数 k_t 是非常重要的参数，可以在相关制造规范中查到。当考虑电动机的动态响应及其负载时，电动机所产生的转矩可以表示为：

$$T = (J_a + J_L)\frac{d\omega}{dt} + T_f + T_L \tag{10-5}$$

其中，J_a 与 J_L 为电枢和附加载荷的极惯性矩；T_f 为与电枢旋转方向反向的摩擦转矩（包括空气阻力）；T_L 为负载转矩。

当永磁直流电动机通电时，转子加速直至达到一个稳态。当处于稳定状态时，式(10-3)可以改写为：

$$V_{in} = RI_{in} + k_e \omega \tag{10-6}$$

如式(10-5)所示，在稳定状态下，电动机的转矩与摩擦和负载转矩相互平衡。

通过将式(10-4)代入式(10-6)，可以得到：

$$V_{in} = \left(\frac{R}{k_t}\right)T + k_e \omega \tag{10-7}$$

同时，式(10-7)可以表示为：

$$T = \left(\frac{k_t}{R}\right)V_{in} - \left(\frac{k_e k_t}{R}\right)\omega \tag{10-8}$$

当给定电压时，上式可以预测永磁直流电动机的线性转矩-转速关系曲线。

图 10-17 所示为当给定电压时，永磁直流电动机的线性转矩-转速曲线和功率-速度曲线。同时，式(10-8)中的线性关系也可以表达为与起动转矩 T_s 和空转最大速度 ω_{max} 有关的方程。

$$T(\omega) = T_s\left(1 - \frac{\omega}{\omega_{max}}\right) \tag{10-9}$$

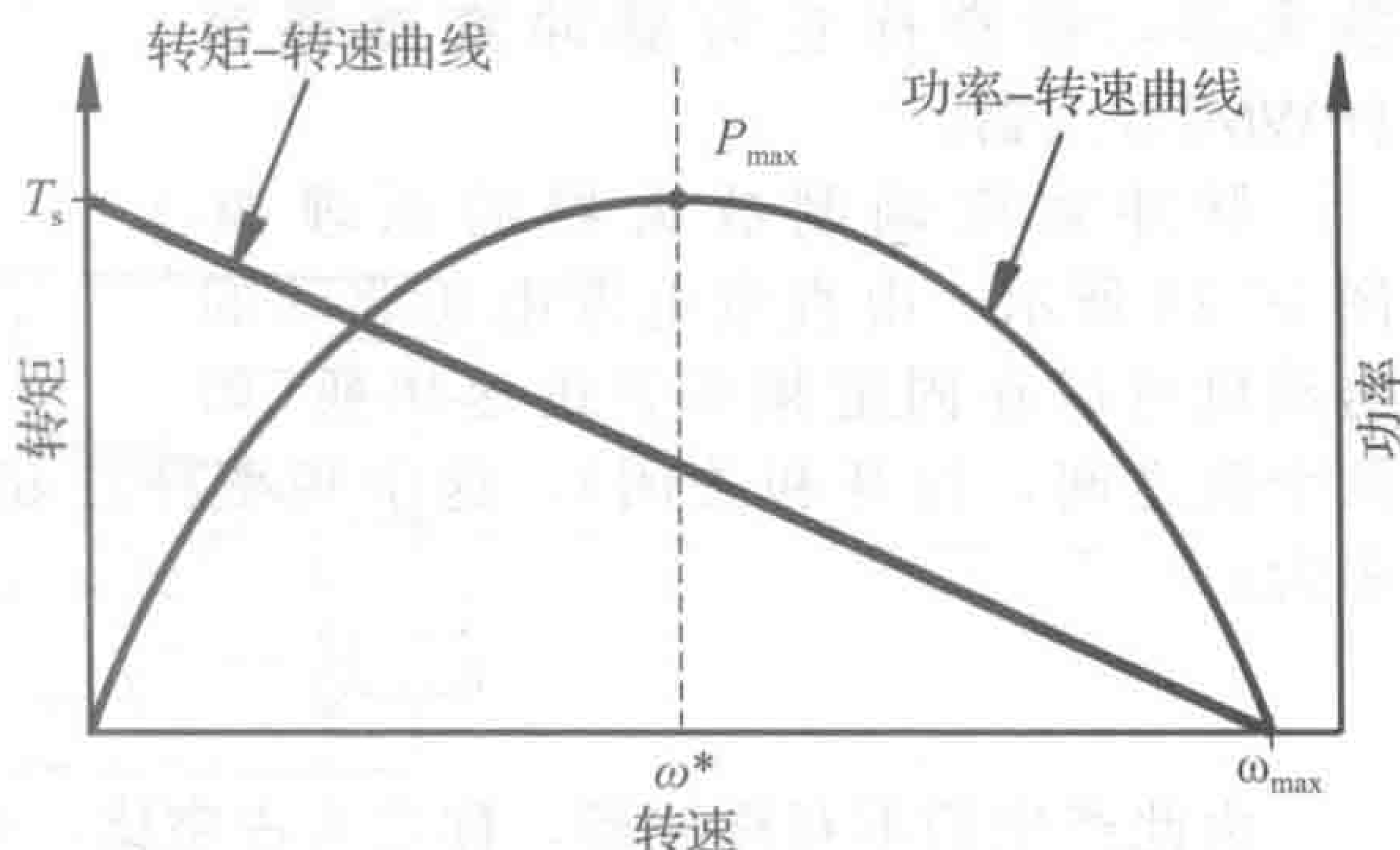


图 10-17 永磁直流电动机的特征

空载转速是在没有负载转矩时电动机的稳态运行速度。此时，电动机的转矩与摩擦转矩是平衡的。

对比式(10-8)和式(10-9)，可知失速

转矩和空载转速与电机相关参数间的关系为：

$$T_s = \left(\frac{k_t}{R}\right)V_{in} \tag{10-10}$$

$$\omega_{max} = \frac{T_s R}{k_e k_t} \tag{10-11}$$

由式(10-9)可得，不同转速下电动机的输出功率可以表示为

$$P(\omega) = T\omega = \omega T_s\left(1 - \frac{\omega}{\omega_{max}}\right) \tag{10-12}$$

当满足式(10-13)的条件时，电机输出功率最大，而此时的转速如式(10-14)所示。

$$\frac{dP}{d\omega} = T_s\left(1 - \frac{2\omega}{\omega_{max}}\right) = 0 \tag{10-13}$$

$$\omega^* = \frac{1}{2}\omega_{max} \tag{10-14}$$

因此，永磁电动机的最佳运行转速是空载转速的一半。

除了电常数和转矩常数之外，制造商往往更为关注电枢电阻 R。结合式(10-4)与式(10-10)，**失速电流**可以表示为与电枢电阻和电源电压有关的表达式：

$$I_s = \frac{V_{in}}{R} \tag{10-15}$$

上述方程是建立在电动机转子不旋转时的。否则转子电流将会受到转子绕组中感应出的反电动势的影响。失速电流是在给定电源电压情况下电动机的最大电流。

10.5.3　永磁直流电动机电气控制

开环控制是电动机控制的最简单形式，只需要设置电动机的驱动电压值，电动机特性和负载就能决定旋转速度和转矩。但通常需要一系列的自动控制，就是通过自动变化的电压产生期望的运动形式。这就是所谓的**闭环控制**与**反馈控制**，它需要一个输出速度和转矩传感器来反馈输出值，并不断将实际测量值与期望值进行比较，该期望值也称为**设定值**。然后控制器主动改变电动机输出值，以使其与设置值更为接近。电子速度控制器有两种常见类型：线性放大器和脉冲宽度调制器。脉宽调制控制器的优点在于它们能够迅速驱动双极型功率晶体管在截止和饱和之间切换，或它们能够打开和关闭场效应晶体管。在这两种情况下，所需要的功耗都很小。伺服放大器使用线性功率放大器来放大信号，但此过程会产生大量的热，因为它们工作于晶体管的线性区域。你会发现商用伺服控制器使用线性放大器，但因为它有较低的电力需求，易于设计、更小的尺寸和更低的成本，所以更为关注这款放大器，通常称它为**脉冲宽度调制(PWM)**放大器。

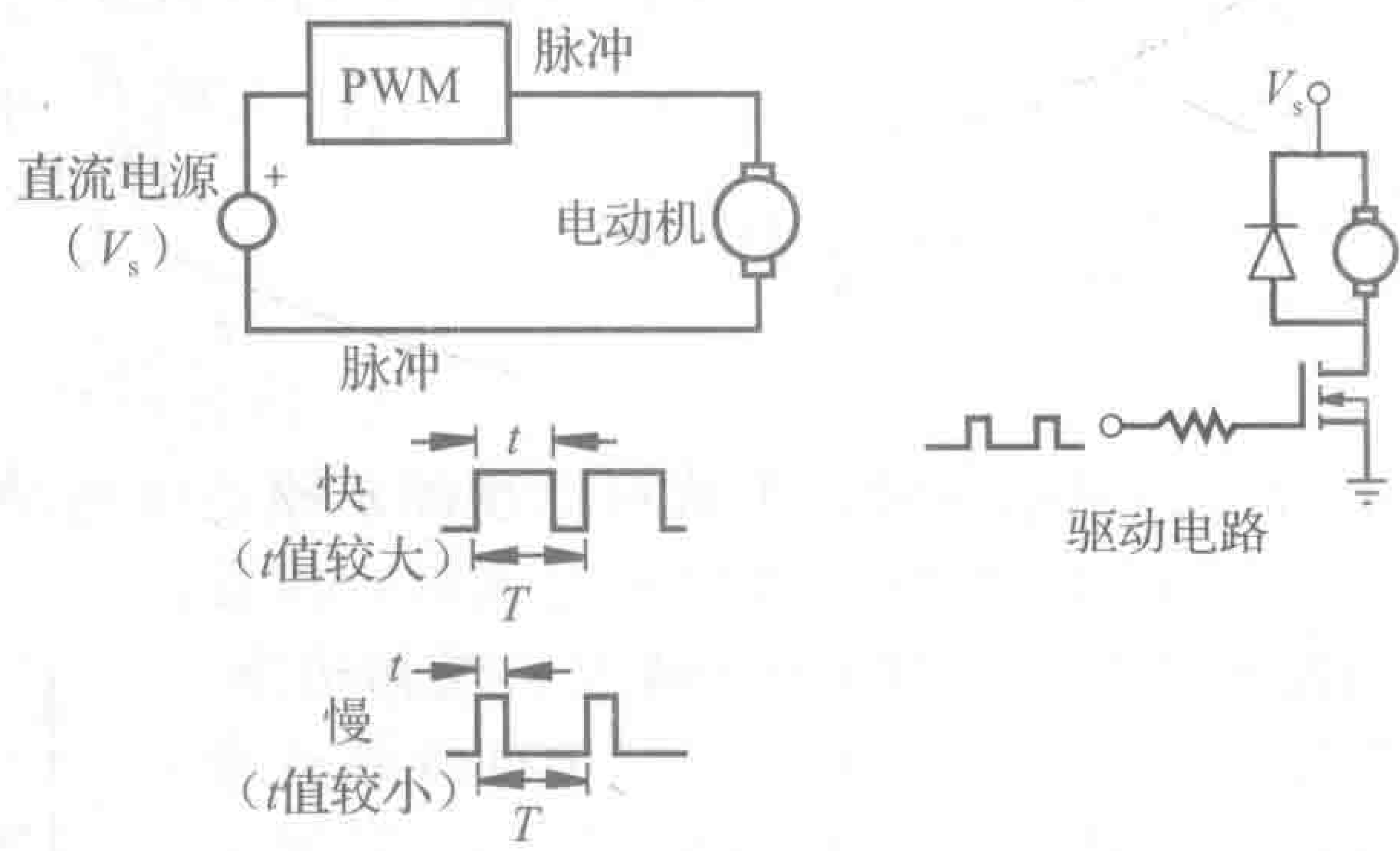


图 10-18　直流电动机的脉宽调制过程

脉冲宽度调制放大器的原理如图 10-18 所示。由直流电源电压驱动的电动机可以在固定频率下迅速切换(如两个值之间，打开和关闭)。这个频率往往超过 1kHz。其频率与周期间的关系可以表示为：

$$T = \frac{1}{f} \tag{10-16}$$

由此产生的不对称波形，称之为**占空比**，可以定义为打开时间与波形周期的比值，通常用百分比来表示，即：

$$\text{占空比} = \frac{t}{T} \times 100\% \tag{10-17}$$

由于占空比发生了变化(通过控制器控制)，所以流过电动机的平均电流也发生变化，从而导致输出速度和转矩的变化。通常主要是通过占空比，而非电源电压的值，来控制电动机的速度。视频演示10.15展示了如何应用脉冲宽度调制信号来控制标准无线电控制伺服电动机(RC)。实验练习11探索了如何用微控制器产生脉冲宽度调制信号来调节直流电动机的速度，其运动的最终结果如视频演示7.5所示。

图10-19所示为脉宽调制直流电动机速度反馈控制系统的框图。电压转速计的输出与电动机转速间存在线性关系，并将此值与设定值进行比较(另一个是电压，它可以手动设置或通过计算机控制)，误差和电动机电流可以通过由脉宽调制调节器产生的一个宽调制方波作为输出来检测。这个信号可以放大足够大以驱动电动机。

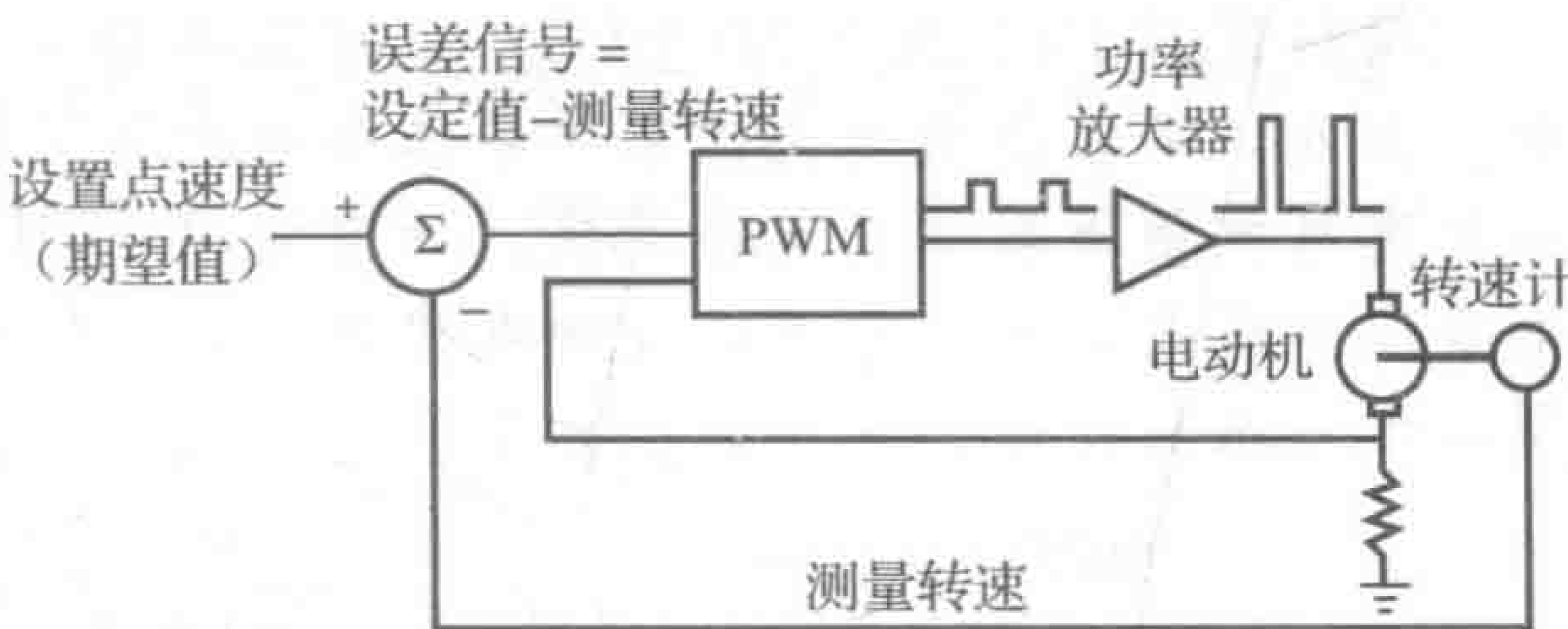


图10-19 脉宽调制速度反馈控制

对于一个脉宽调制控制器来说，电枢电压可以迅速切换，同时受电动机电感和电阻的影响，电动机电流也会发生相应的变化。如图10-20所示，由于快速地通断，电动机中产生的电流具有一个围绕平均值的较小波动。随着占空比的增大，平均电流及电动机转速也随之增加。

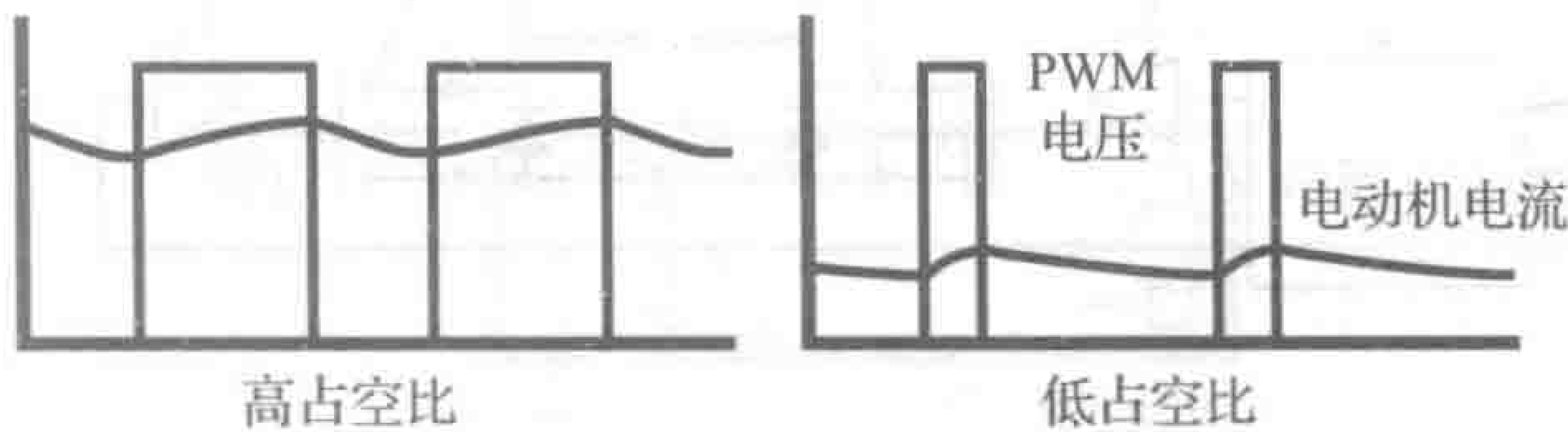
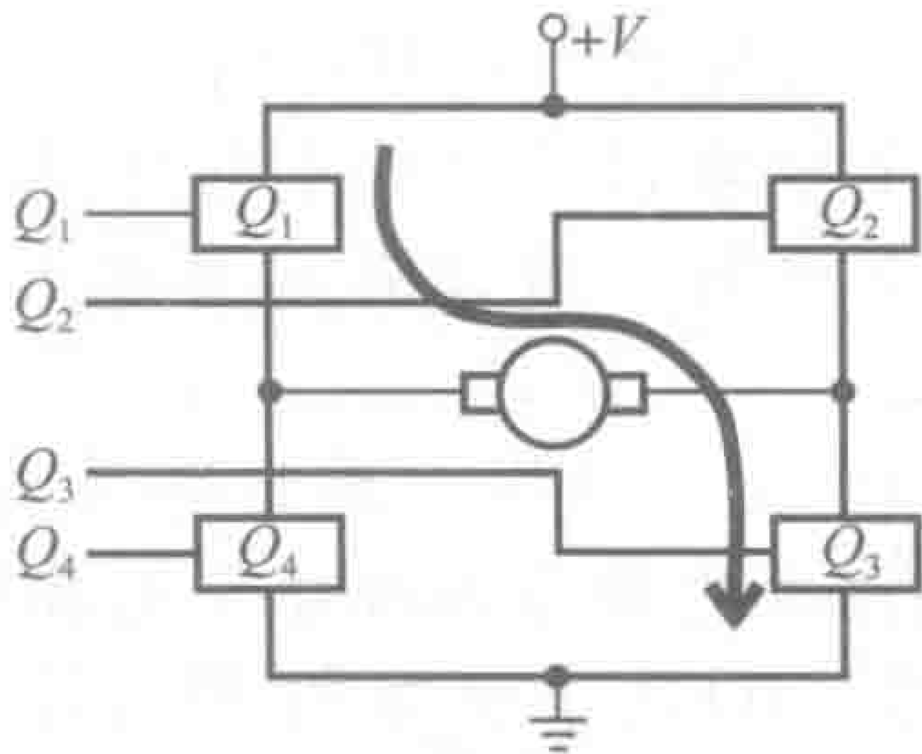


图10-20 脉宽调制电压与电动机电流

设计实例10.1 直流电动机的H桥驱动

虽然可以通过离散控制和功率组件来设计和搭建一个伺服电动机驱动电路，但几种集成电路设计方案可以在机电一体化设计上节省巨大的时间和金钱。考虑最为普通的直流电动机的控制问题。控制的最终的目的可能是控制速度、旋转方向、角度或转矩。

为了控制直流电动机的速度，必须能够改变供给电动机的电流。为了控制旋转方向，电动机中的电流方向必须是可反向的。这需要一个电流放大器及切换电流方向的一些方法。**H桥**的概念即可满足这些需求。H桥使用4个开关(继电器或晶体管)在直流电动机上布置为一个H形(见下图)。某个时间只切换一对开关的状态以获得所需的运动方向。

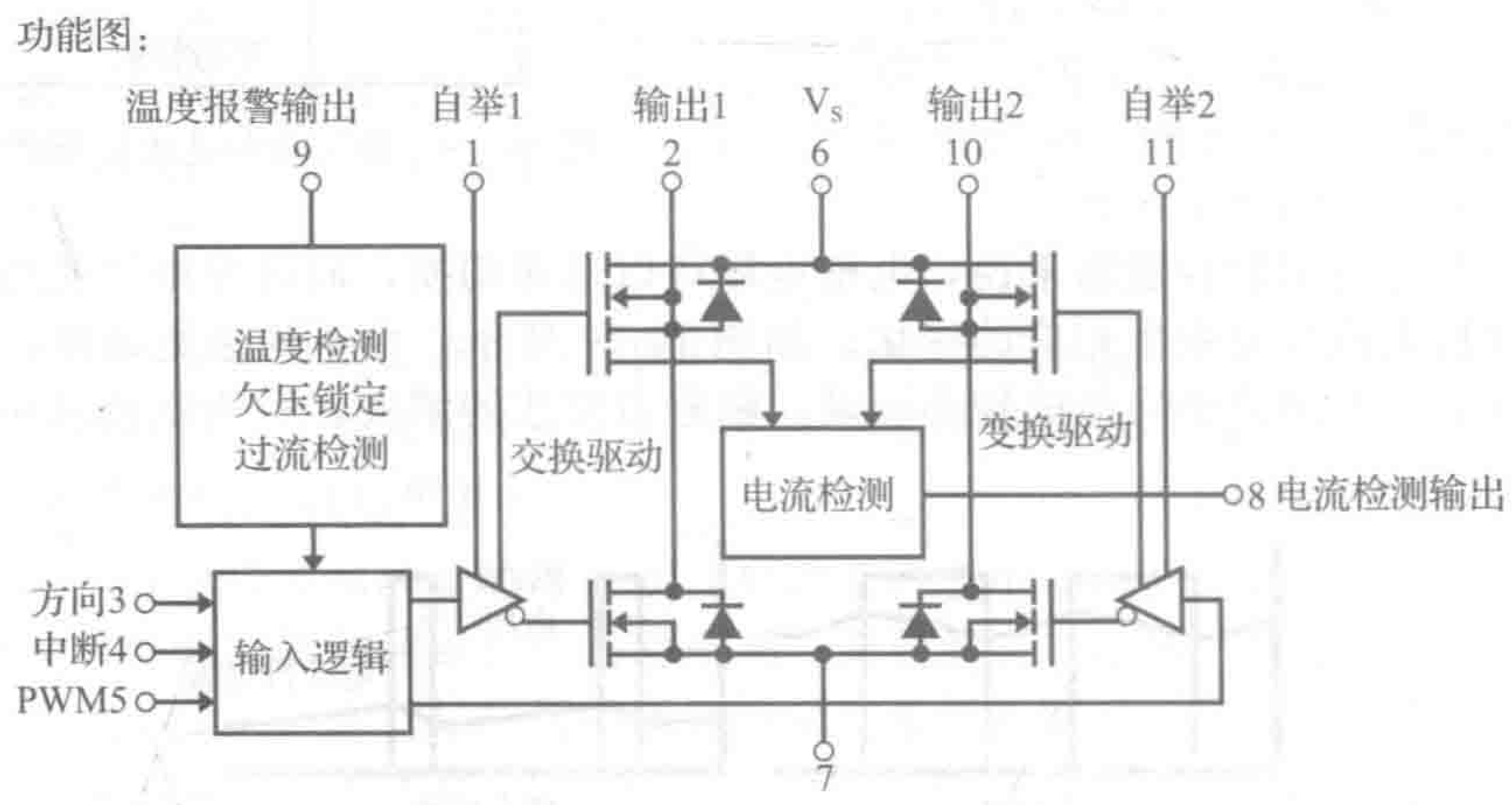


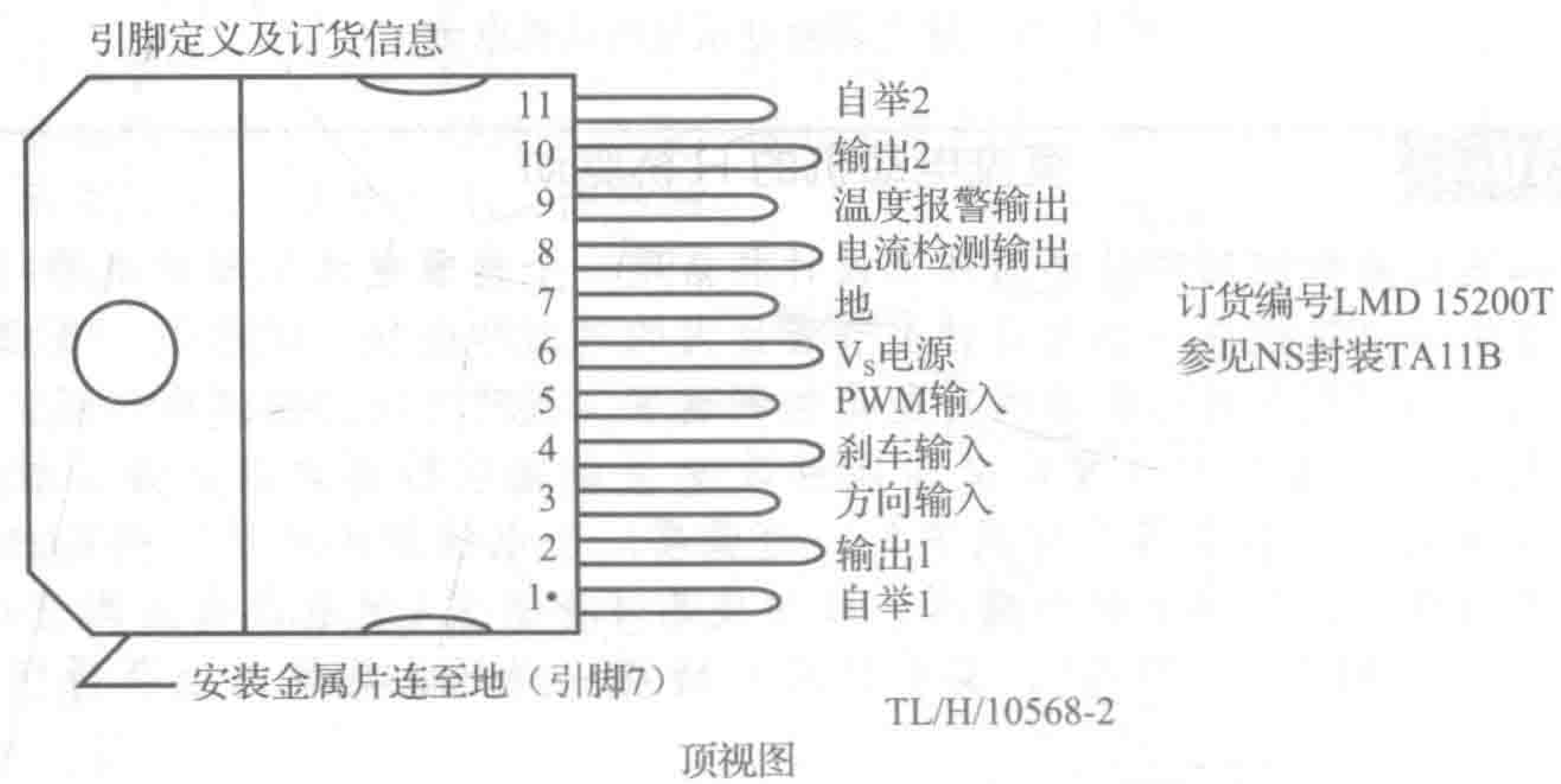
如果Q_1和Q_3开启，Q_2和Q_4关闭，电流流动方向如图所示，且电动机按一个方向旋

转。相反，如果 Q_2 和 Q_4 开启，Q_1 和 Q_3 关闭，电动机将变换旋转方向。

使用继电器可以很容易地搭建一个 H 桥(4 个 SPST 或 2 个 DPDT)；然而，继电器不能非常快地切换，因此限制了 PWM 选项。此外，由于继电器属于机械设备，所以它们可能会在多次通断后出现磨损和失效。但对只需要电动机反转而不需要 PWM 速度控制的应用场合，继电器是一个不错的选择。对于希望利用 PWM 调速的应用场合来说，晶体管或固态继电器则是更好的选择。网络链接 10.3 指向一个如何使用各种各样的组件构建 H 桥的资源信息和建议。

同样通过 BJT 或者 MOSFET 也可以构建一个离散的 H 桥，但很难选择合适的晶体管。因此，可以使用美国国家半导体公司的运动控制集成电路，这个单一的解决方案，这一方案可方便地驱动直流电动机。考虑使用 LMD15200 来设计一个 3A、55V 的 H 桥来驱动直流步进电动机。它可以控制电流方向，还能提供过电流和超温检测的特性、脉冲宽度调制和动态制动等。其功能图如下所示。

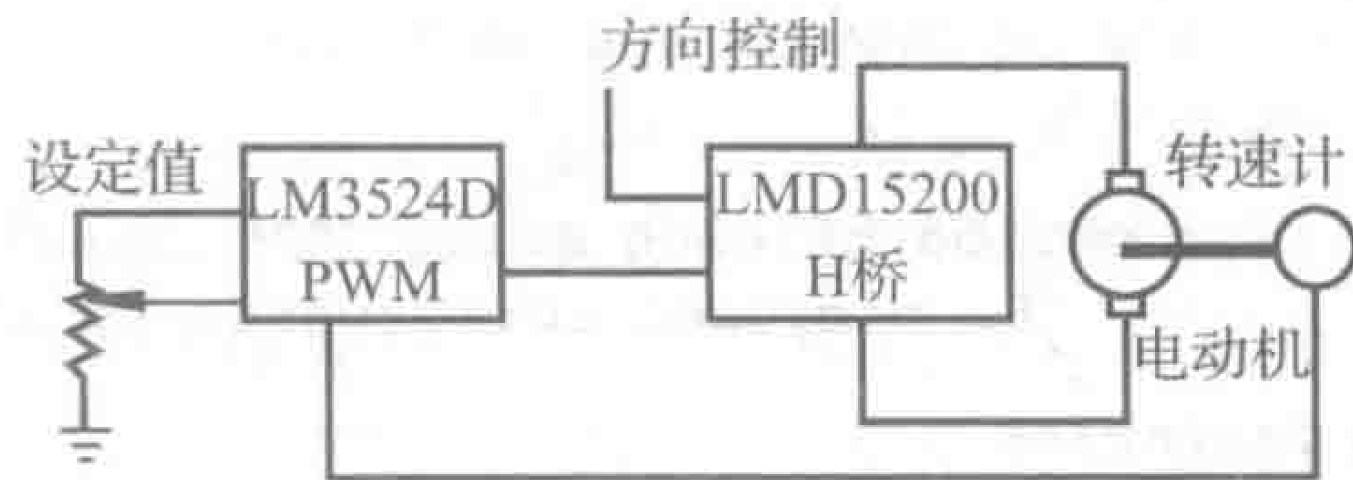




顶视图

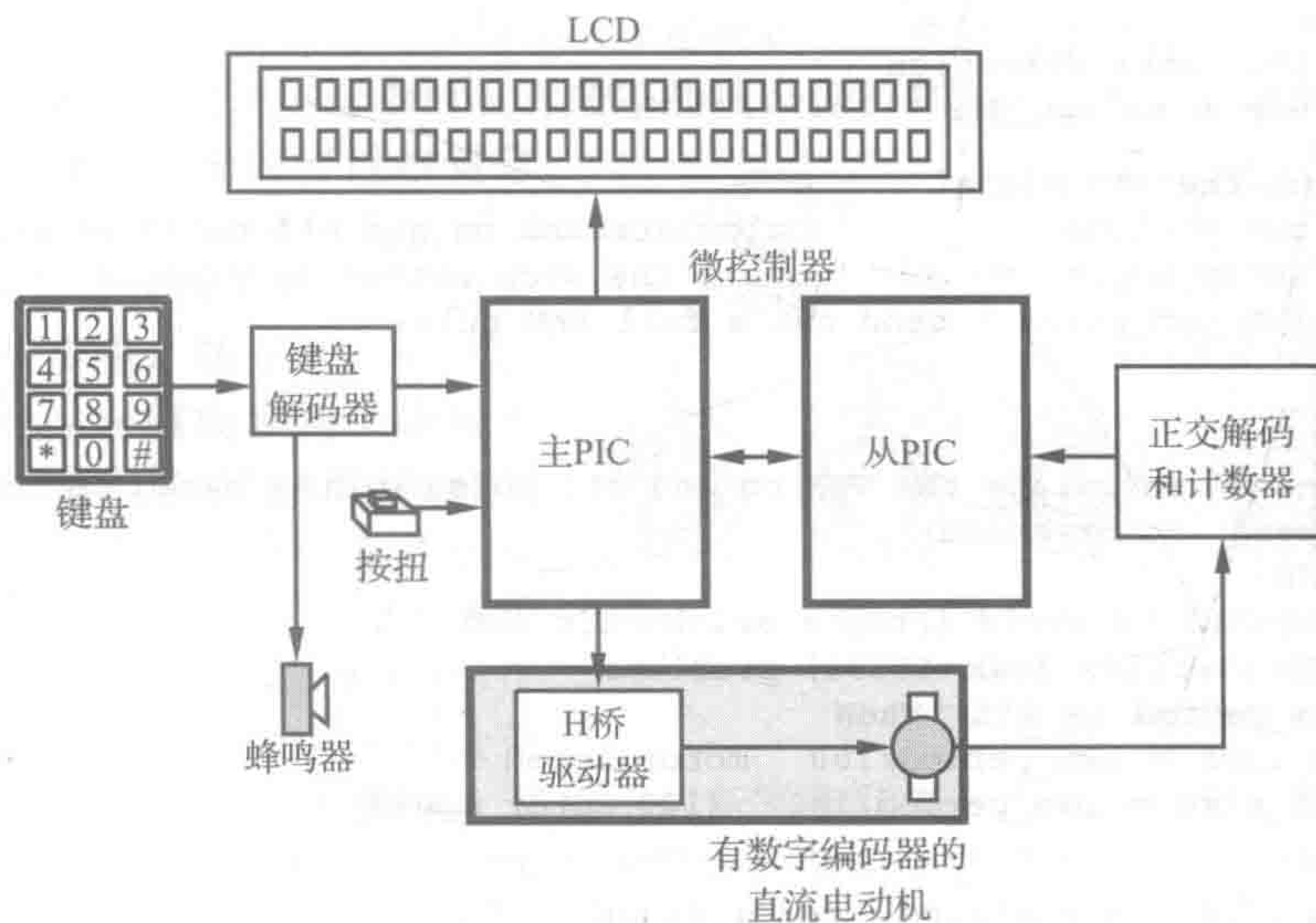
本设计采用带有续流保护二极管的 MOSFET，它可以抑制通过晶体管的反向瞬变电流。电动机两极的连接输出 1 和输出 2。电源电压的最大值为 55V。外部数字信号可以控制方向、制动和脉冲宽度调制。当设备温度超过 170℃时，温度传感器将会切断输出。

下图所示为完整的速度控制器设计框图。通过电位器或输入电压来控制速度的设定值。一个转速计作为提供电动机速度的传感器添加到电动机系统中。同时，美国国家半导体公司的脉冲宽度调制芯片 LM3524D 用于驱动 H 桥电动机控制器的输入。



渐进设计实例 C.5 直流电动机位置和速度控制器——H 桥驱动和 PWM 调速

下图显示了渐进设计实例 C 的功能图(参见 1.3 节和视频演示 1.8),突出显示的这里将重点描述。



下图为该部分设计的完整电路。在电路设计过程中选用一个商用 S17-3A-LV 型 H 桥,选用该电桥的原因在于其有足够大的电流容量并可与所选电动机兼容。而且在很大程度上,PWM 占空比和电动机转速之间也呈近似线性的关系。H 桥和电动机的详细信息如网络链接 10.4 所示。H 桥的两个输入将会决定电动机是顺时针或逆时针旋转,而 PWM 则可以通过一个适当的占空比来控制电动机的速度。



下面为驱动电动机使其达到所需速度的程序代码。子程序 pwm_periods 先计算脉冲段宽度来建立一个与所需电动机转速成正比的占空比。调用子程序 pwm_pulse 阶段可以保持电机的旋转速度在设定值上。代码中的注释解释了一些运行程序中的细节。

```
' Define I/O pin names
motor_dir Var PORTB.7       ' motor H-bridge direction line
motor_pwm Var PORTB.6       ' motor H-bridge pulse-width-modulation line

' Declare Variables
motor_speed Var BYTE        ' motor speed as percentage of maximum (0 to 100)
motion_dir Var BIT          ' motor direction (1:CW/Forward 0:CCW/Reverse)
on_time Var WORD            ' PWM ON pulse width
off_time Var WORD           ' PWM OFF pulse width
```

```
pwm_cycles Var BYTE       ' # of PWM pulses sent during the position control loop

' Define constants
pwm_period Con 50         ' period of each motor PWM signal cycle (in microsec)
                          '   (50 microsec corresponds to 20kHz)

' Initialize I/O and variables
TRISB.6 = 0               ' configure H-bridge DIR pin as an output
TRISB.7 = 0               ' configure H-bridge PWM pin as an output
motion_dir = CW           ' starting motor direction: CW (forward)
motor_speed = 50          ' starting motor speed = 50% duty cycle
Low motor_pwm             ' make sure the motor is off to begin with

' Subroutine to run the motor at the desired speed and direction until the
'    stop button is pressed. The duty cycle of the PWM signal is the
'    motor_speed percentage
run_motor:
    ' Set the motor direction
    motor_dir = motion_dir

    ' Output the PWM signal
    Gosub pwm_periods            ' calculate the on and off pulse widths
    While (stop_button == 0)     ' until the stop button is pressed
        Gosub pwm_pulse ' send out a full PWM pulse
    Wend
Return

'Subroutine to calculate the PWM on and off pulse widths based on the desired
' motor speed (motor_speed)
pwm_periods:
    ' Be careful to avoid integer arithmetic and
    '   WORD overflow [max=65535] problems
    If (pwm_period >= 655) Then
        on_time = pwm_period/100 * motor_speed
        off_time = pwm_period/100 * (100-motor_speed)

    Else
        on_time = pwm_period * motor_speed / 100
        off_time = pwm_period *(100-motor_speed) / 100
    Endif
Return

' Subroutine to output a full PWM pulse based on the data from pwm_periods
pwm_pulse:
    ' Send the ON pulse
    High motor_pwm
    Pauseus on_time

    ' Send the OFF pulse
    Low motor_pwm
    Pauseus off_time
Return
```

10.6 步进电动机

作为一种典型的直流电动机，**步进电动机**是一种永磁或可变磁阻的直流电动机，其具有以下特点：双向旋转、精确的角位移增量、零速度时维持恒转矩及数字电路控制。通过给驱动电路发送一个数字脉冲可以使电动机实现精确的角增量，称为**步**。脉冲的数量和速率可以控制电动机轴的位置和速度。总体来说，步进电动机在一个周期中可以旋转 12 步、24 步、72 步、144 步、180 步和 200 步，即相当于每步轴的旋转增量为 30°、15°、5°、2.5°、2°和 1.8°。特殊的**微步进电路**设计可以使得一个周期有更多的步数，通常可以达到 10000 步/周期或更多。

步进电动机可以是双极的，即它需要两个电源或一个极性可切换的电源，或是单极的，只需要一个电源。它们是由直流电源驱动，并需要数字电路产生使电动机线圈旋转的激励序列。在控制过程中并不总是需要反馈的，在对位置控制精度要求较高的场合下，使用编码器或其他位置传感器也可以保证其控制的精确性。没有反馈操作的优点(即在开环模式下)是一个闭环控制系统所不具备的。一般来说，步进电动机的功率小于 1hp (746W)，因此只应用于低功耗的位置控制的应用场合。视频演示 9.2 和 10.16 为学生使用步进电动机的示例。

一个商用步进电动机有大量的磁极，这些磁极就决定了大量转子的平衡位置。在永磁步进电动机中，定子包含绕线磁极，而转子磁极是永磁的。它们能够激励不同的定子绕组部分运转并支撑不同位置的转子。**可变磁阻式**步进电动机有一个铁磁转子而非永磁转子。运动与保持主要来自于定子和转子磁极与最小磁阻(磁场阻力)位置间的吸引力，即允许的最大磁通。可变磁阻式电动机具有低转子惯性的优点，因此具有更快的动态响应。永磁步进电动机的优点在于当定子不运动时具有较小的残余保持转矩，也称为**起动转矩**。

为了进一步了解转子如何以增量形式运动，对图 10-21 所示的一个包括 4 个定子磁极和一个永磁转子的简单设计进行分析。在 0 步中，转子处于平衡状态，因为定子的反向磁极和转子磁极靠近并互相吸引。除非定子磁极的极性发生改变，否则转子仍在相应位置并承受名为**保持转矩**的反向力矩。当定子磁极的极性发生图 10-21 所示的变化时(0 步到 1 步)，作用于转子上的转矩将会使其在顺时针方向上旋转 90°，并达到 1 步所示的新平衡状态。当定子磁极的极性再次如图 10-21 所示发生改变时(1 步到 2 步)，转子在转矩的驱动下达到 2 步。以这种方式改变定子的极性可以使得转子连续在平衡位置按顺时针方向旋转。也就是说磁极激励的顺序意味着旋转的方向，同时，通过反向的极性顺序可以使得转子发生逆时针旋转。而电动机转矩直接与磁极及转子的磁场强度有关。

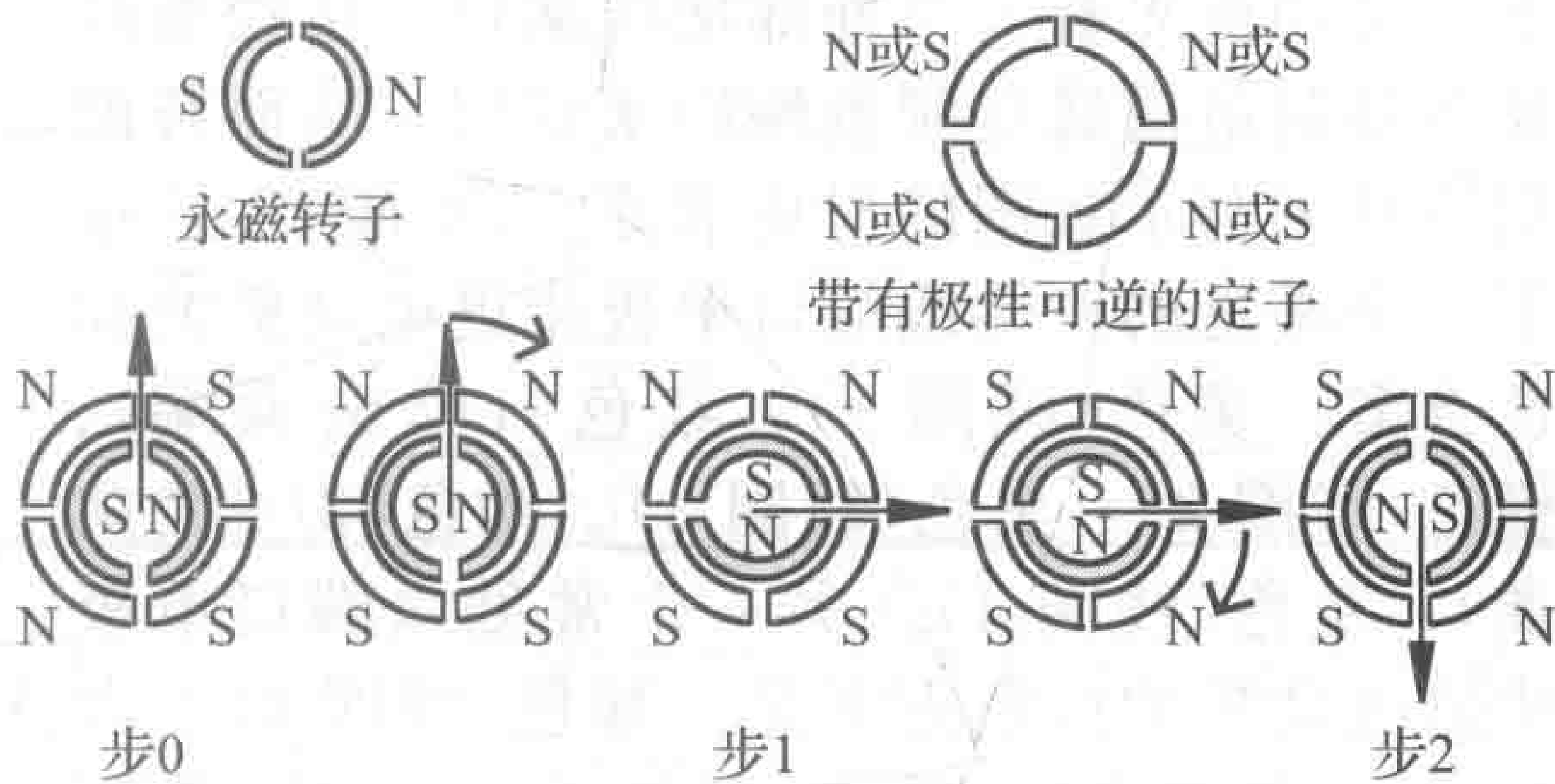


图 10-21 步进电动机的步序

在电动机的应用过程中，必须仔细考虑转子和附加负载的动态响应，动态响应包括有快速起动与停止、快速加速或变速，驱动大负载或变负载。由于转子的惯性和附加负载的作用，可以达到所需的旋转步数。如图 10-22 所示，步进电动机通过阶跃输入驱动一个典型的机械系统，这将很好展示一个欠阻尼响应。如果系统中的阻尼增加，通过机械摩擦、黏滞阻尼，响应可以修正以减少振动。但值得注意的是，即使对于阻尼有理想的选择，电动机也需要时间来调整以完全达到设定的位置，稳定时间随着步幅和阻尼的数量而变化。同样重要的是，电动机转矩随着阻尼的增加而增加。视频演示 10.17 显示了一个典型欠阻尼二阶系统响应的步进电动机，此电动机的步幅很大。它还同时表明随着步率增加的响应变化。视频演示 10.18 显示了电动机在中速运行情况下的慢动作，并表明在步率较高时，步响应的影响将会变得不明显了。

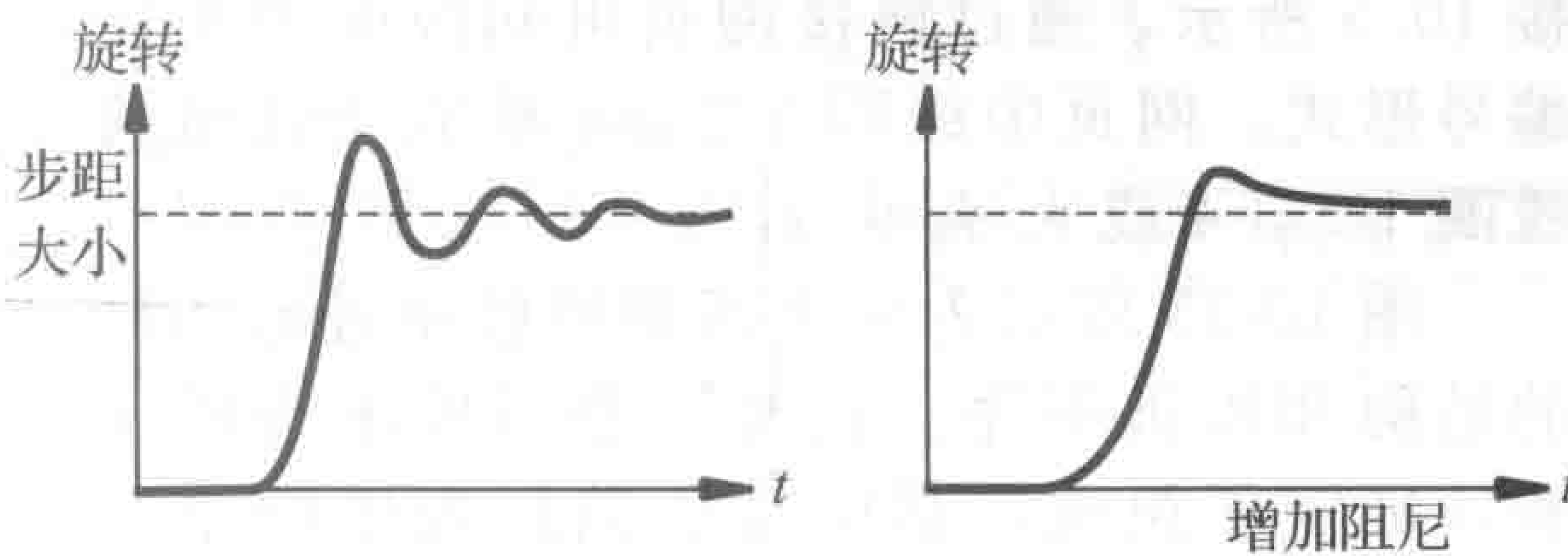


图 10-22 单步旋转的动态响应

图 10-23 所示为步进电动机的转矩-转速特征曲线，它通常可以分为两个区域。在锁步模式下，转子的旋转减慢，甚至可能步与步之间达到静止。在这个区域，电动机可以在不失步的情况下实现瞬间起动、停止或反向转动。**旋转模式**速度太快，所以允许瞬时起

动、停止或反转。转子必须逐渐加速进入这个模式，逐步减速离开这个模式。在旋转模式下，转子与定子磁场同步旋转之间，步与步之间不稳定。两区域间的曲线表明在非旋转模下步进电动机在不同速度时可以提供的最大转矩。临近旋转模式以外的区域代表步进电动机在不同转速下所能提供的绝对最大转矩。

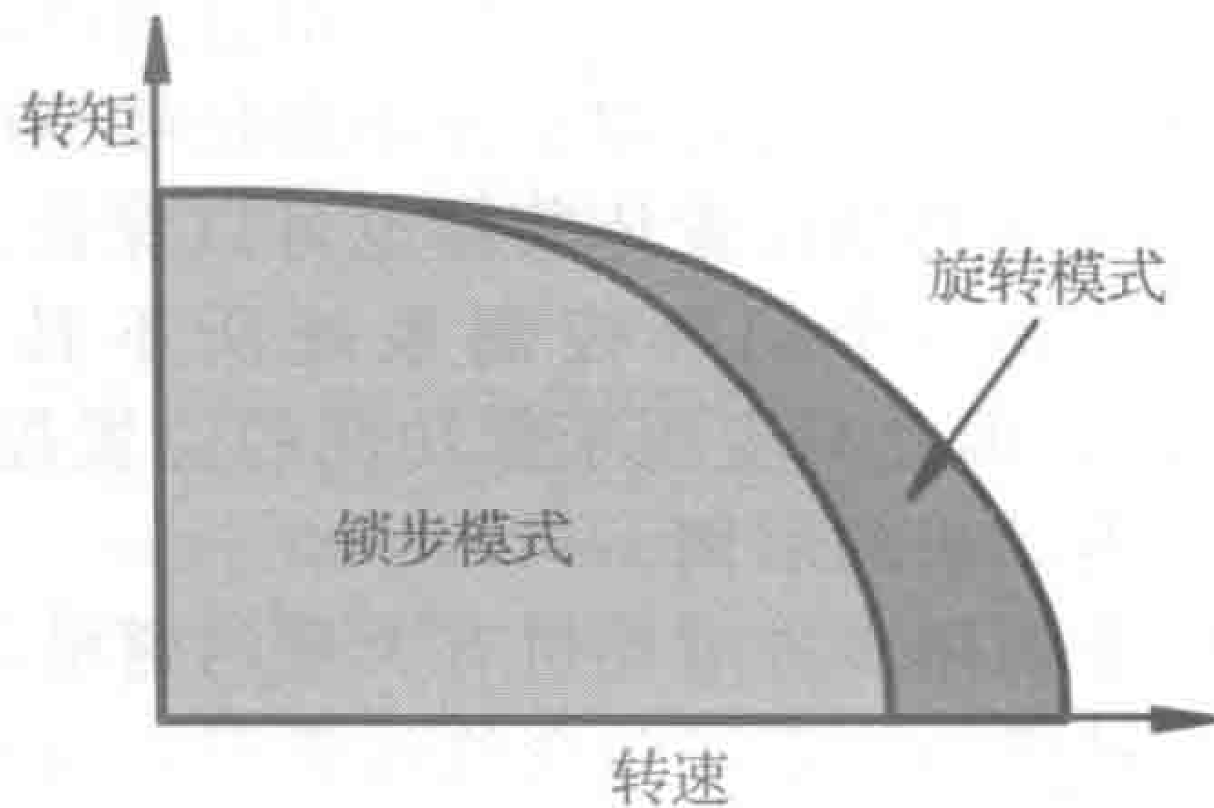


图 10-23　步进电动机的转矩-转速曲线

图 10-24 展示了一个单极步进电动机励磁线圈的示意图，它通过外部功率晶体管的开启和关闭来产生定子极性的控制序列从而产生旋转。图 10-24 所示为与电动机连接的 6 个接线端口的示意图。如图所示，因为第二和第五个接线端口通常是连接到外部的，所以制造商有时将其与电动机内部连接，因此在这种情况下，电动机只有 5 个外部接线端口。接线端口通常被制造商通过颜色编码来标识，从而帮助用户找到与示意图的对应关系。图 10-24 显示了一个常见的六接线端口单极步进电动机的标色方案：黄色(线圈 1)、红色(1/2 公共端)、橙色(线圈 2)、黑色(线圈 3)、绿色(3/4 公共端)、灰色(线圈 4)。另一个常见六端口单极步进电动机的标色方案是：绿色(线圈 1)、白色(1/2 公共端)，蓝色(线圈 2)、红色(线圈 3)、白色(3/4 公共端)、黑色(线圈 4)。常见五线式单极步进电动机的标色方案是：红色(线圈 1)、绿色(线圈 2)、黑色(公共端)、棕色(线圈 3)、白色(线圈 4)。如果你遇到了一个没有指示文档和标色方案的电动机，可以通过一个测试过程来确定接线端口(如网络链接 10.5 所示，通过链接网页可知线圈的不同编号形式。网页中线圈 3-2-1-4 对应于这里的线圈 1-2-3-4 或 ϕ_1-ϕ_2-ϕ_3-ϕ_4)。

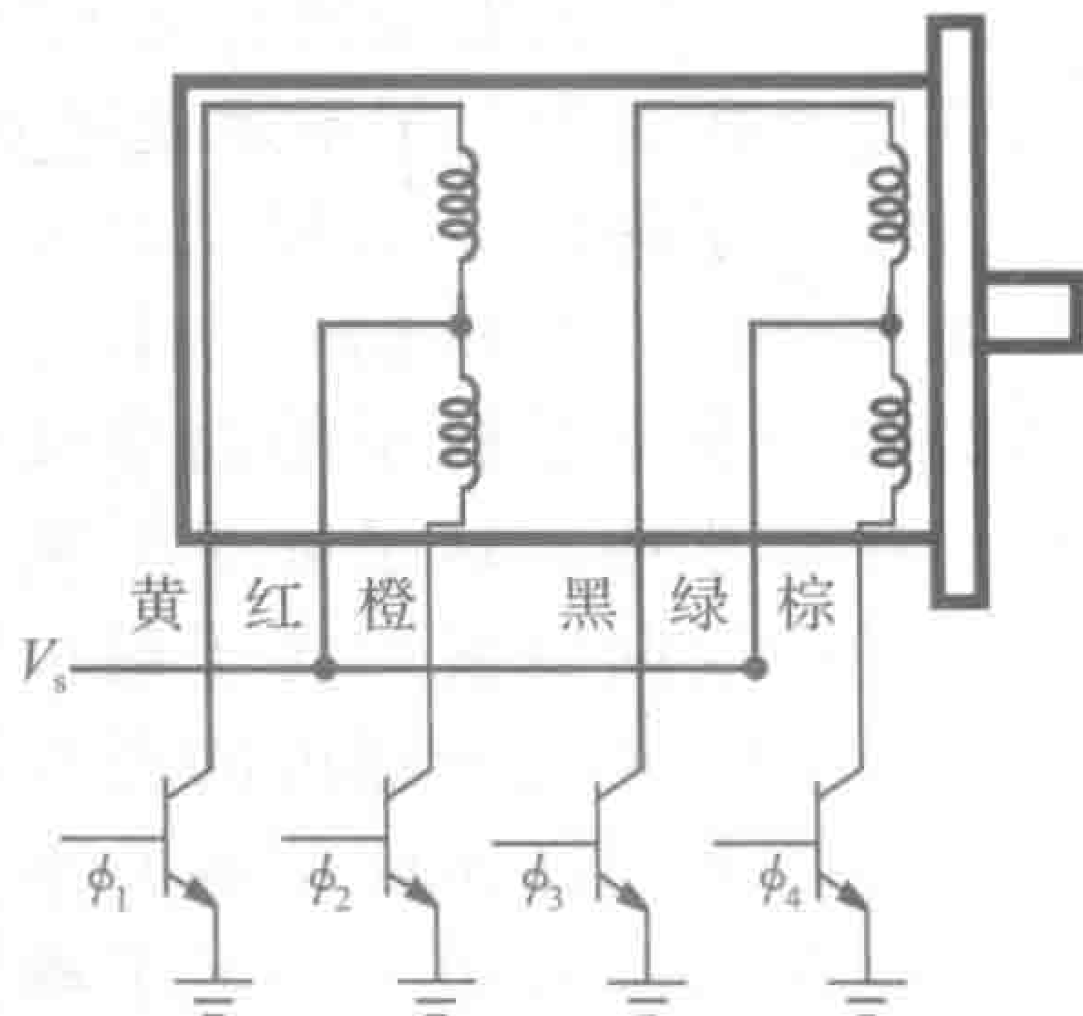


图 10-24　标准单极步进电动机励磁线圈原理图

图 10-25 所示为一个四相单极步进电动机的结构和步进顺序。它由一个两极永磁转子和四极定子组成，其中定子的每极由两个互补的绕组组成(如在左上角磁极上 ϕ_1 与 ϕ_2 以相反的方向相互缠绕)。表 10-1 列出了步进电动机在一个全步过程中所需的相序，其中四个磁极中的两个是打开的并且每个定子磁极均被极化了。表 10-2 列出了半步相序的步进电动机，在每个完整的步中只有一个相是打开的而且只有两个定子磁极是极化的。此时电动机的分辨率或步数(8 步/每步 45°)是半步模式(4 步/每步为 90°)下的两倍，但在半步模式下保持转矩和驱动转矩在两个值之间交替周期性发生变化。另一个增加步数的方法为**等步细分**，在此阶段相电流主要由分级数量所决定，而不是打开和关闭，因此导致磁场两极之间有更多的平衡位置。实际上，作用于每相上的是离散正弦波，而不是矩形波。最常见商用步进电动机在全步模式下为 200 步/周期，有时也称为 1.8°(360/200)。在等步细分模式下，每周期可以完成 10 000 或更多的步。

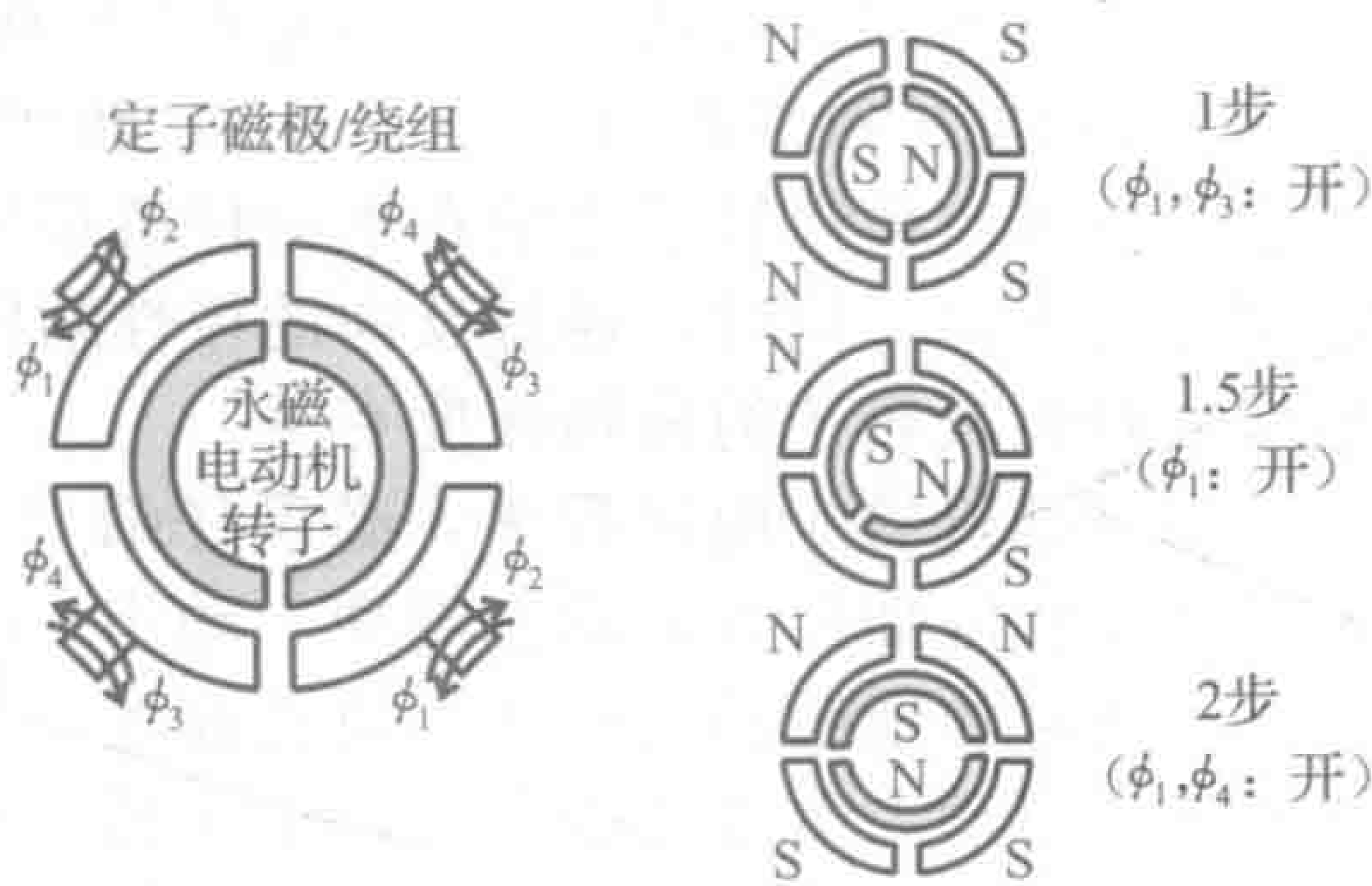


图 10-25　单极步进电动机示例

图 10-26 所示为一个双极步进电动机原理图，通过外部功率晶体管的开启和关闭命令组合可使定子极性发生变化，从而产生旋转的控制序列。与电动机相连接的是 4 个接线端

口，可以容易地与五线或六线的单极步进电动机相区别。接线端口通常由制造商通过颜色标注的形式使其与示意图一致。图10-26所示为一个常用于双极步进电动机的配色方案：线圈A的红色(+)和灰色(—)、线圈B的黄色(+)和黑色(—)。

表10-1 单极电动机在全步模式下的相序

CW ↓ CCW ↑

步	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
1	开	关	开	关
2	开	关	关	开
3	关	开	关	开
4	关	开	开	关

表10-2 单极电动机在半步模式下的相序

CW ↓ CCW ↑

步	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
1	开	关	开	关
1.5	开	关	关	关
2	开	关	关	开
2.5	关	关	关	开
3	关	开	关	开
3.5	关	开	关	关
4	关	开	开	关
4.5	关	关	开	关

表10-3所示为双极步进电动机在全步模式下完成一步所需的相序要求。该表与单极(见表10-1)是相同的，但是这里两个晶体管为打开或关闭状态一起切换而不是一个单极序列。晶体管是所谓的H桥配置(如设计实例10.1和网络链接10.3所示)。通过成对切换晶体管，可以实现电流的反向。例如，在1步中，晶体管1和4是打开的，晶体管2和3是关闭的。这将使得线圈A正向旋转，产生一个正向电流($I_A>0$)。同样在1步中，晶体管5和8打开，晶体管6和7关闭，在线圈B上产生一个正向电流($I_B>0$)。在2步中，晶体管5和8关闭，而6和7打开，这使得线圈B中的电流反向($I_B<0$)。表10-4列出了半步电动机的相序。与单极电动机一样，因为只有一个线圈工作，所以在半步位置只有一半的保持转矩。

表10-3 双极电动机在全步模式下的相序

CW ↓ CCW ↑

步	ϕ_1 与 ϕ_4	ϕ_2 与 ϕ_3	ϕ_5 与 ϕ_8	ϕ_6 与 ϕ_7
1	开	关	开	关
2	开	关	关	开
3	关	开	关	开
4	关	开	开	关

表10-4 双极半步电动机的相序

CW ↓ CCW ↑

步	ϕ_1 与 ϕ_4	ϕ_2 与 ϕ_3	ϕ_5 与 ϕ_8	ϕ_6 与 ϕ_7
1	开	关	开	关
1.5	开	关	关	关
2	开	关	关	开
2.5	关	关	关	开
3	关	开	关	关
3.5	关	开	关	关
4	关	开	开	关
4.5	关	关	开	关

图 10-27 所示为一个实际步进电动机的结构、极性的几何形状和线圈连接的详细说明。这个步进电动机可以作为一个四相单极电动机或两相双极电机来使用。图 10-28 显示了一个有 50 齿的分裂式转子，它的一端为北极，而另一端为南极，这样可以产生大量的有效磁极。网络链接 10.6 为各种步进电动机产品的资料和制造商的链接。

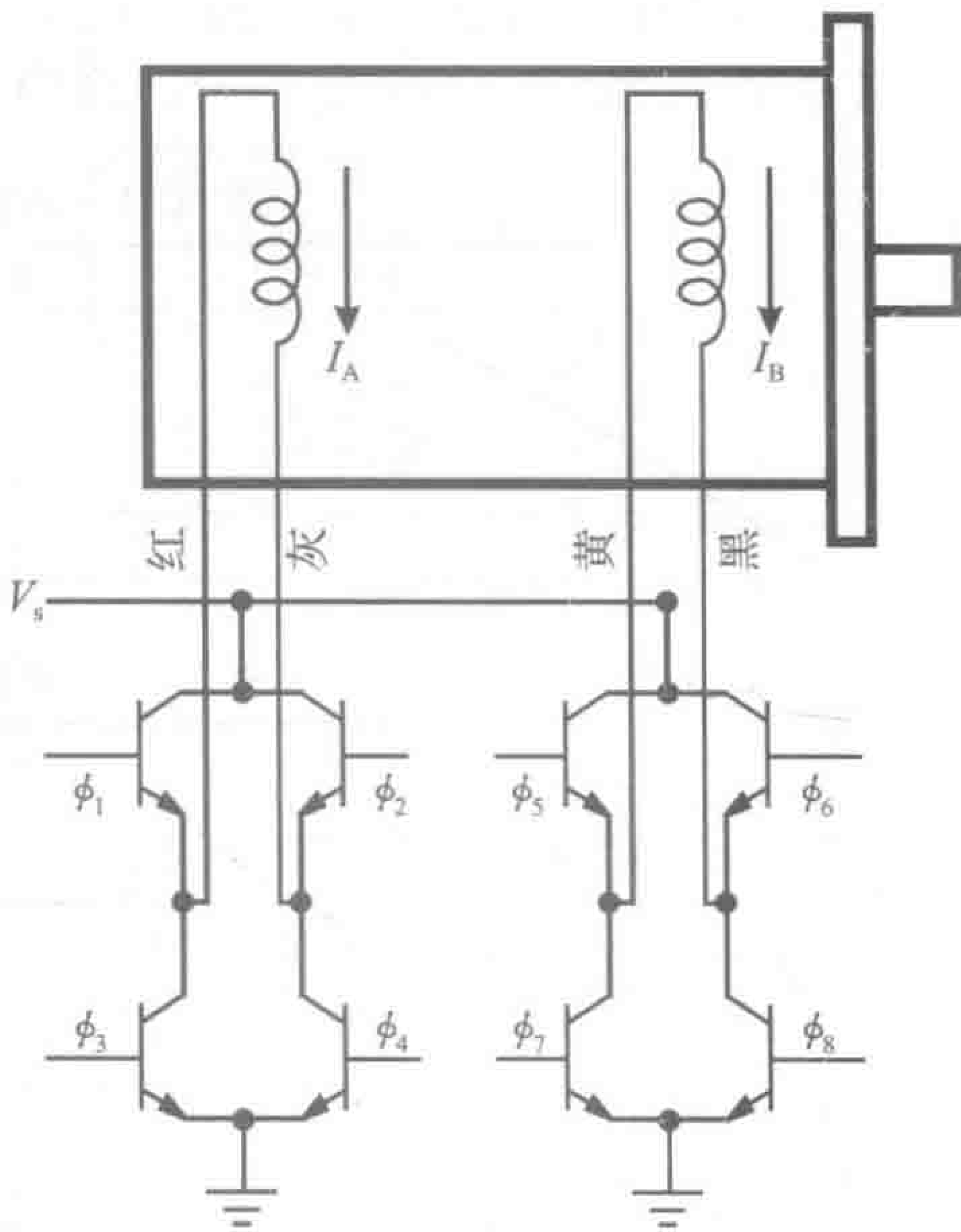


图 10-26　标准双极步进电动机的励磁线圈示意图

步进电动机的驱动电路

图 10-29 所示为在全步模式下驱动单极步进电动机旋转的电路，使用图中所示元器件可以很容易且便宜地驱动电动机。类似驱动电路可作为单片集成电路购买得到（如 E-Lab 的 EDE1200、Signetics 的 SAA1027 及 Allegro Microsystems 的 UCN 5804B 等）。数字电路包括 7414 施密特触发器缓冲器、74191 可逆计数器和 7486 异或门。在旋转方向（CW 或 CCW）、若存在初始化（复位）和单步输入的情况，噪声或波动时，施密特触发器（见 6.12.2 节）产生一个具有快速上升与下降定义明确的控制信号。可逆计数器和异或门反过来生成 4 个正常相序的电动机驱动信号。这 4 个数字信号（ϕ_1、ϕ_2、ϕ_3、ϕ_4）与功率晶体管的基极耦合，从而按顺序对连接到直流电源的电动机线圈产生激励，并使轴旋转。在阶跃输入阶段，每一个方波脉冲都会使电动机按照由 CW/CCW 输入所决定的方向开始一个完整步的旋转。

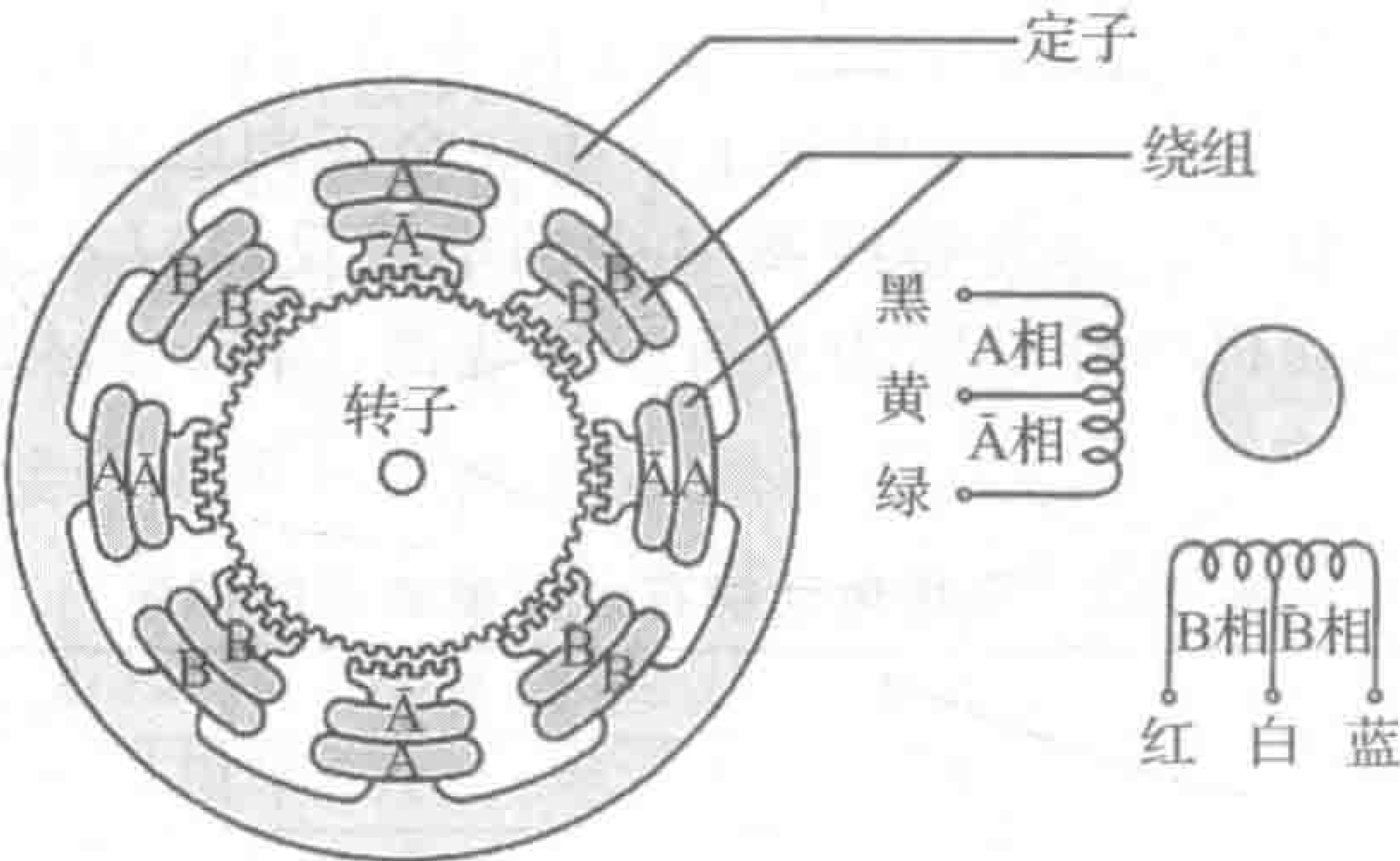


图 10-27　典型步进电动机的转子和定子配置（由东方电机公司提供）

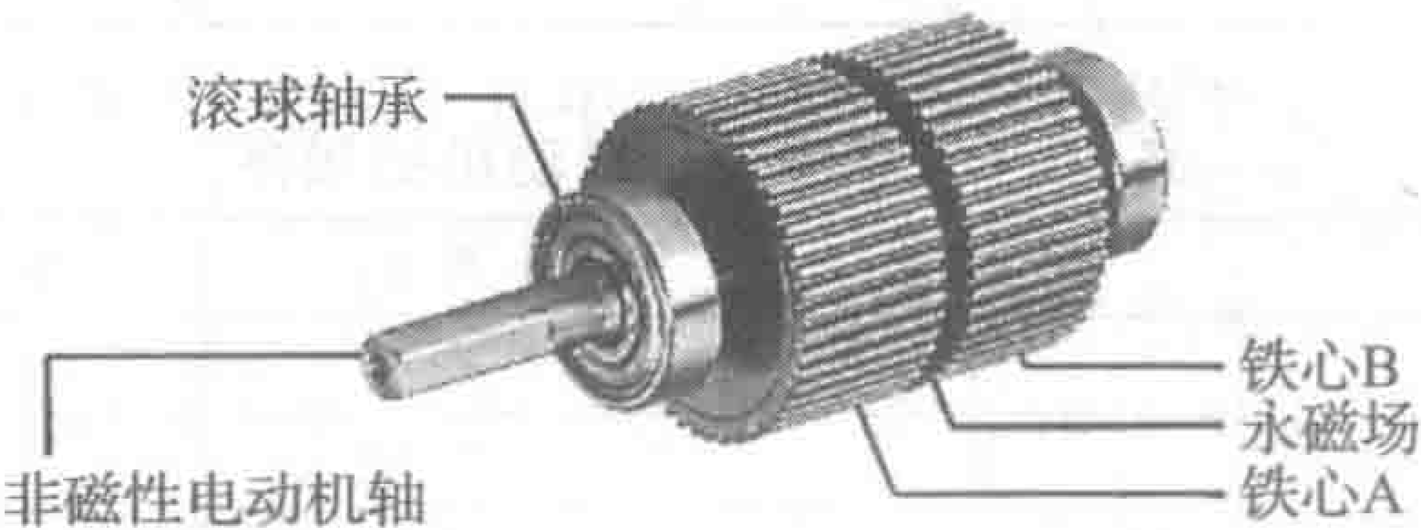


图 10-28　实际步进电动机的转子［由东方电机公司提供（材料为不锈钢 SVS303 或等价材料）］

图 10-30 所示为在计数器中两个最低有效输出位 B_0 和 B_1 和相位控制信号的时序图。与表 10-1 中的信号序列进行比较可以发现它们是一致的。通过两个计数器所产生 4 个布尔形式的期望输出可以表达为与或非及异或的形式：

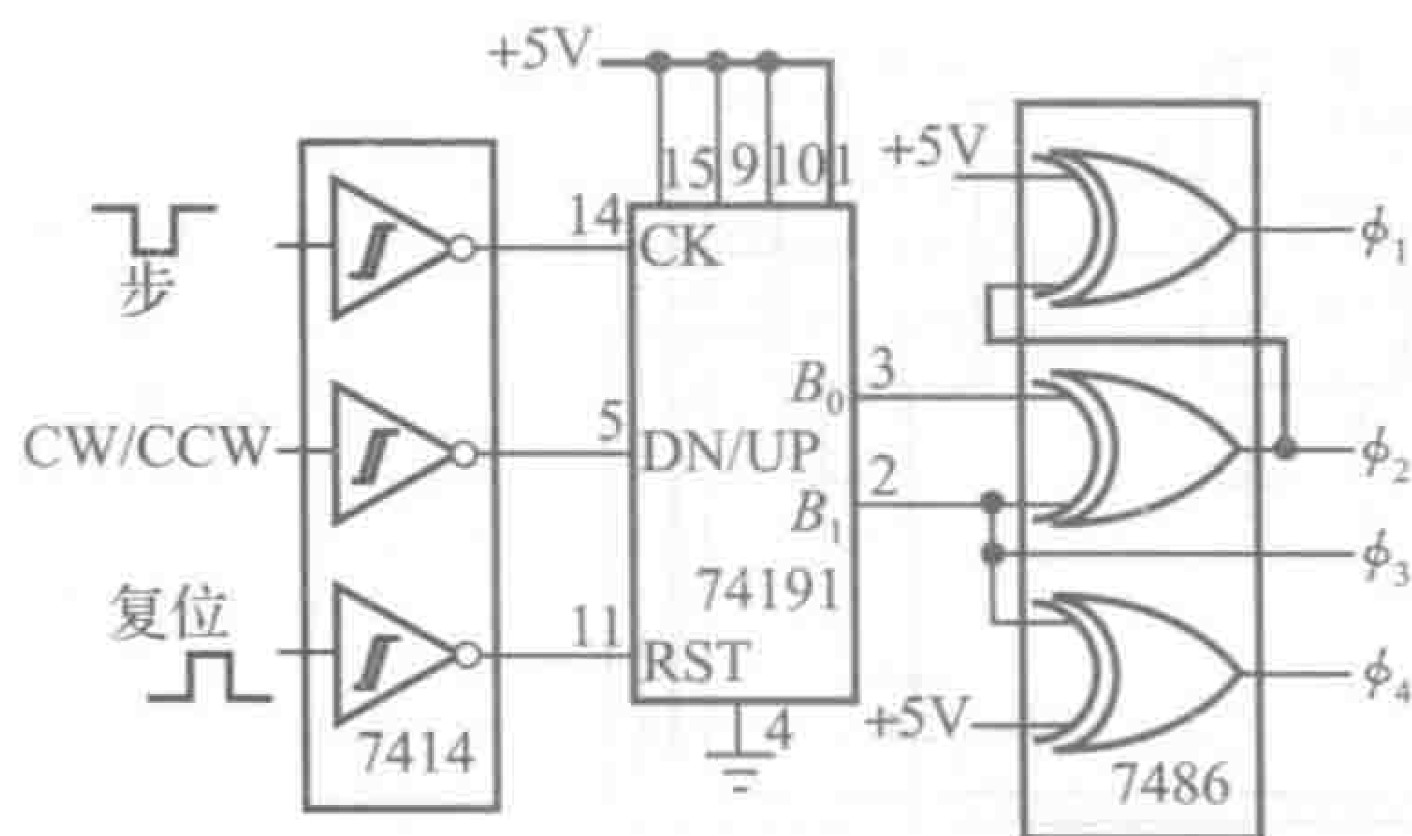


图 10-29 单极步进电动机全步驱动电路

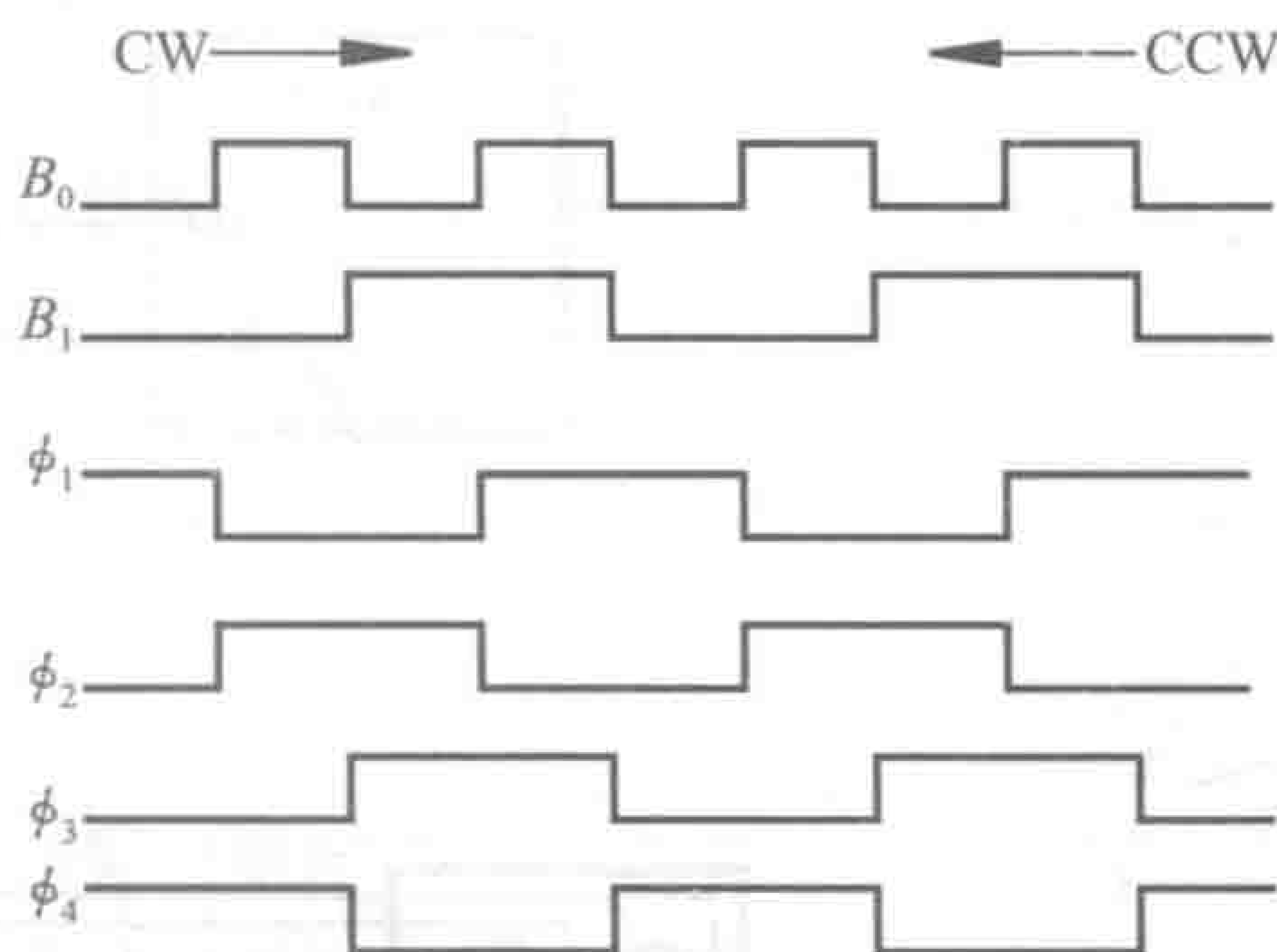


图 10-30 全步单极步进电动机驱动电路时序图

$$\phi_1 = \overline{\phi}_2 = \phi_2 \oplus 1$$
$$\phi_2 = (B_0 \cdot \overline{B}_1) + (\overline{B}_0 \cdot B_1) = B_0 \oplus B_1$$
$$\phi_3 = B_1$$
$$\phi_4 = \overline{B}_1 = B_1 \oplus 1 \tag{10-18}$$

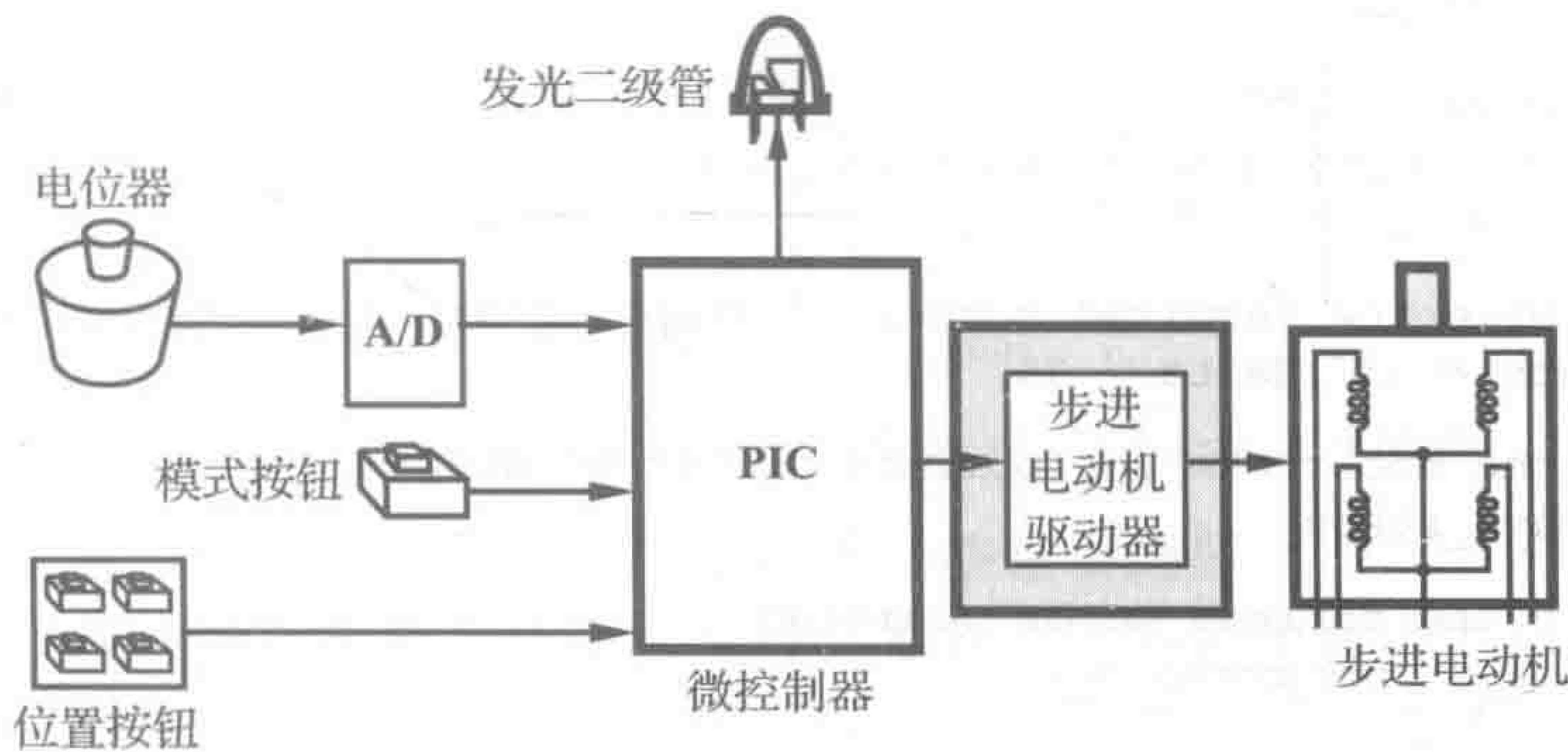
通过图 10-30 所示的在不同时间点的信号值可以对上述表达式进行验证(见课堂讨论项目 10.5)。通过异或形式来代替布尔运算的目的在于允许使用单片芯片 IC(四异或 7486)来执行相应的逻辑；否则，执行与、或、非 3 个动作就需要 3 片芯片。

课堂讨论项目 10.5 步进电动机的逻辑

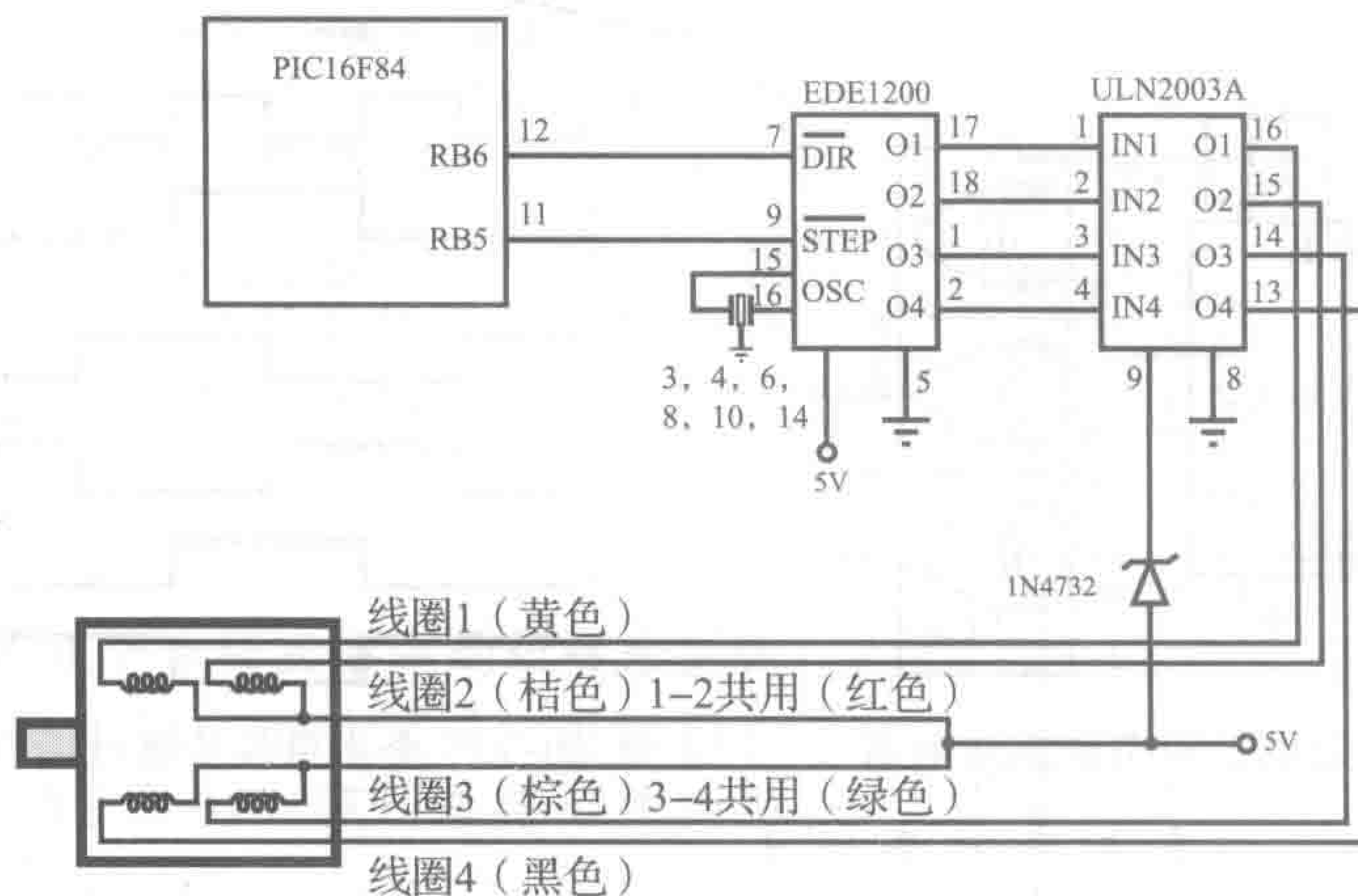
根据图 10-30 所示的时序图构造一个真值表，并验证式(10-18)是否正确。同时，表示与 φ_2 等价的积和形式。

渐进设计实例 B.3 步进电动机位置和速度控制器——步进电动机驱动器

下图为渐进设计实例 B 的功能框图(参见 1.3 节和视频演示 1.7)，重点部分已突出显示。



下图为通过 PIC 来驱动一个步进电动机需要的所有组件和连接。在该设计中，商用步进电动机驱动器集成电路及 E-Lab EDE1200 是主要的组件。这些组件的详细信息如网络链接 7.16 中的数据手册所示。PIC 只需要产生两种信号来驱动电动机：方向线和步线。每次发送一步的脉冲，步进电动机按顺时针或者逆时针方向旋转一步，其旋转方向是由方向线所决定的。通过 ULN2003A 与 EDE1200 的结合可以为驱动典型的步进电动机线圈提供足够的电流。参考 EDE1200 数据手册以获取更多信息。



如下所示为驱动电动机的代码。“move”子程序首先决定了运动所需的方向和速度的大小，用户设置的“new_motor_pos”值可与当前电动机位置(motor_pos)相比较来确定和设置运动方向并计算所需的步数。然后子例程“move_steps”步骤(在子程序“step_motor”的帮助下)发送脉冲到电动机上并产生旋转。而转速是由一个预先设置的“step_period”函数集所决定的。

程序如下：

```
' Define I/O pin names
motor_dir Var PORTB.6        ' stepper motor direction bit (0:CW 1:CCW)
motor_step Var PORTB.5       ' stepper motor step driver (1 pulse = 1 step)

' Define Constants
CW Con 0                     ' clockwise motor direction
CCW Con 1                    ' counterclockwise motor direction

' Subroutine to move the stepper motor to the position indicated by motor_pos
'   (the motor step size is 7.5 degrees)
move:
    ' Set the correct motor direction and determine the required displacement
    If (new_motor_pos > motor_pos) Then
       motor_dir = CW
       delta = new_motor_pos - motor_pos

    Else
       motor_dir = CCW
       delta = motor_pos - new_motor_pos
    EndIf

    ' Determine the required number of steps (given 7.5 degrees per step)
    num_steps = 10* delta / 75

    ' Step the motor the appropriate number of steps
    Gosub move_steps

    ' Update the current motor position
    motor_pos = new_motor_pos
Return

' Subroutine to move the motor a given number of steps (indicated by num_steps)
move_steps:
    For i = 1 to num_steps
        Gosub step_motor

    Next
Return

' Subroutine to step the motor a single step (7.5 degrees) in the motor_dir
```

```
'    direction
step_motor:
    Pulsout motor_step, 100 *step_period ' (100 * 10microsec = 1 millisec)
    Pause step_period
    ' Equivalent code:
    ' High motor_step
    ' Pause step_period
    ' Low motor_step
    ' Pause step_period
Return
```

10.7 选择电动机

在为一个机电一体化应用选择电动机时，设计师必须考虑许多因素和规范，包括：速度范围、转矩-转速变化、可逆性、工作制、起动转矩和功率要求等。下面以列表的形式来描述这些和其他因素，而这些问题是一个设计师在选择或与电动机制造商协商来调整电动机外形尺寸时所必须要考虑的。正如我们看到的，转矩-转速曲线提供了很多重要的信息，帮助回答了许多关于电动机性能的问题。回想一下，转矩-转速曲线显示了在不同电压和不同转速条件下电动机所输出的转矩。图 10-31 显示了一个步进电动机的转矩-转速曲线，而图 10-32 显示了一个伺服电动机的转矩-转速曲线。上述例图来源于电动机制造商的说明书。

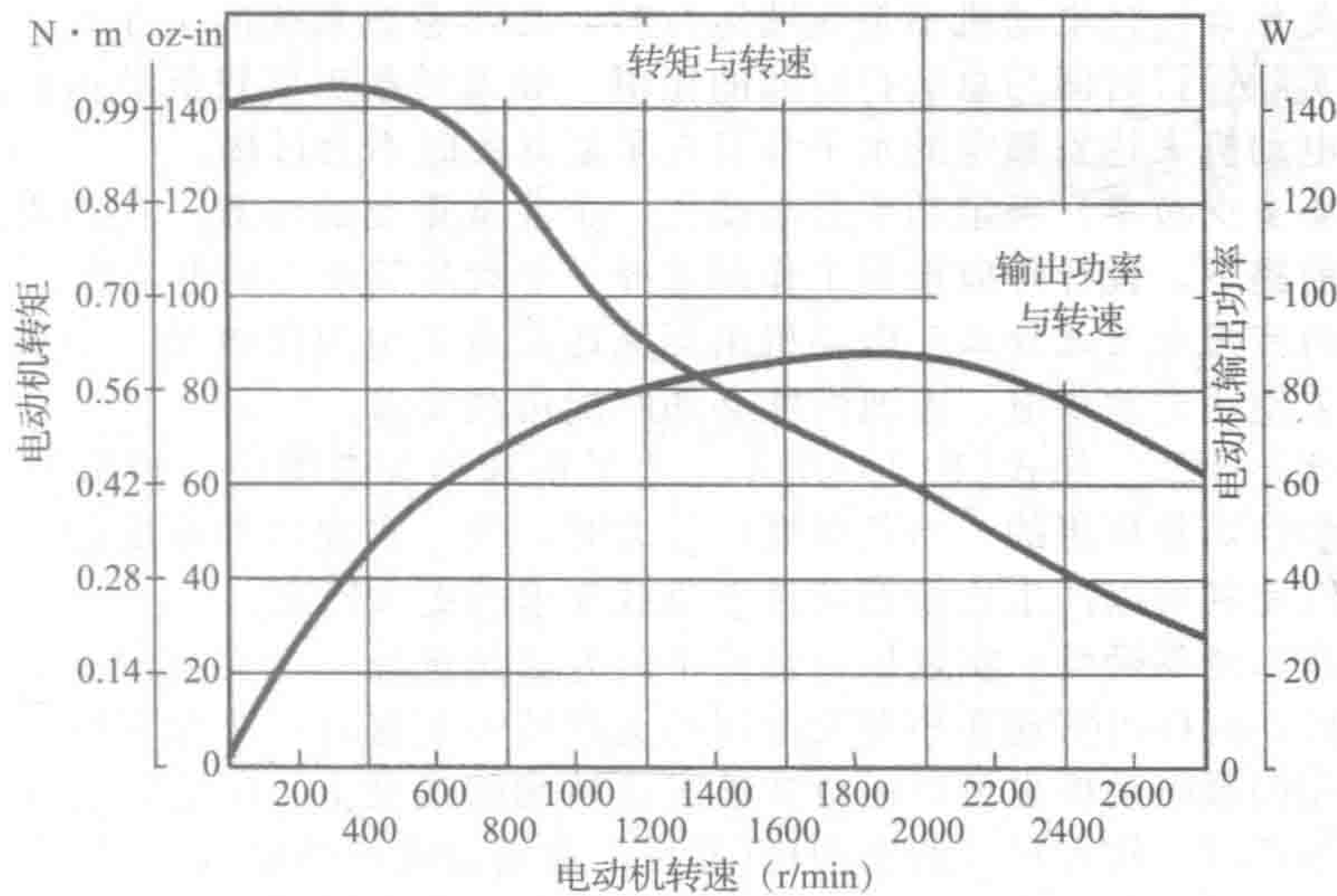


图 10-31 典型步进电动机的特性曲线(由 Aerotech 公司提供)

一个设计人员在选择电动机时需要考虑以下一些重要问题：

- 电动机将会起动并加速至足够快速度吗？零速度时的转矩称为起动转矩，它是电动机开始旋转时所能传输的转矩。对于自起动的系统来说，电动机产生的转矩需要能够克服摩擦和负载转矩。

  在任何瞬间电机和负载的加速度可以表示为：

$$\alpha = (T_{motor} - T_{load})/J \tag{10-19}$$

  其中，α 为角加速度，单位为 rad/s^2；T_{motor} 为电动机产生的转矩；T_{load} 为负载消耗的转矩；J 为电动机转子与负载所产生的极惯性矩总和。系统的加速度主要是由电动机输出转矩与负载转矩间的不同所决定的。当电动机转矩与负载转矩相同时，系统运行于稳定的工作转速。

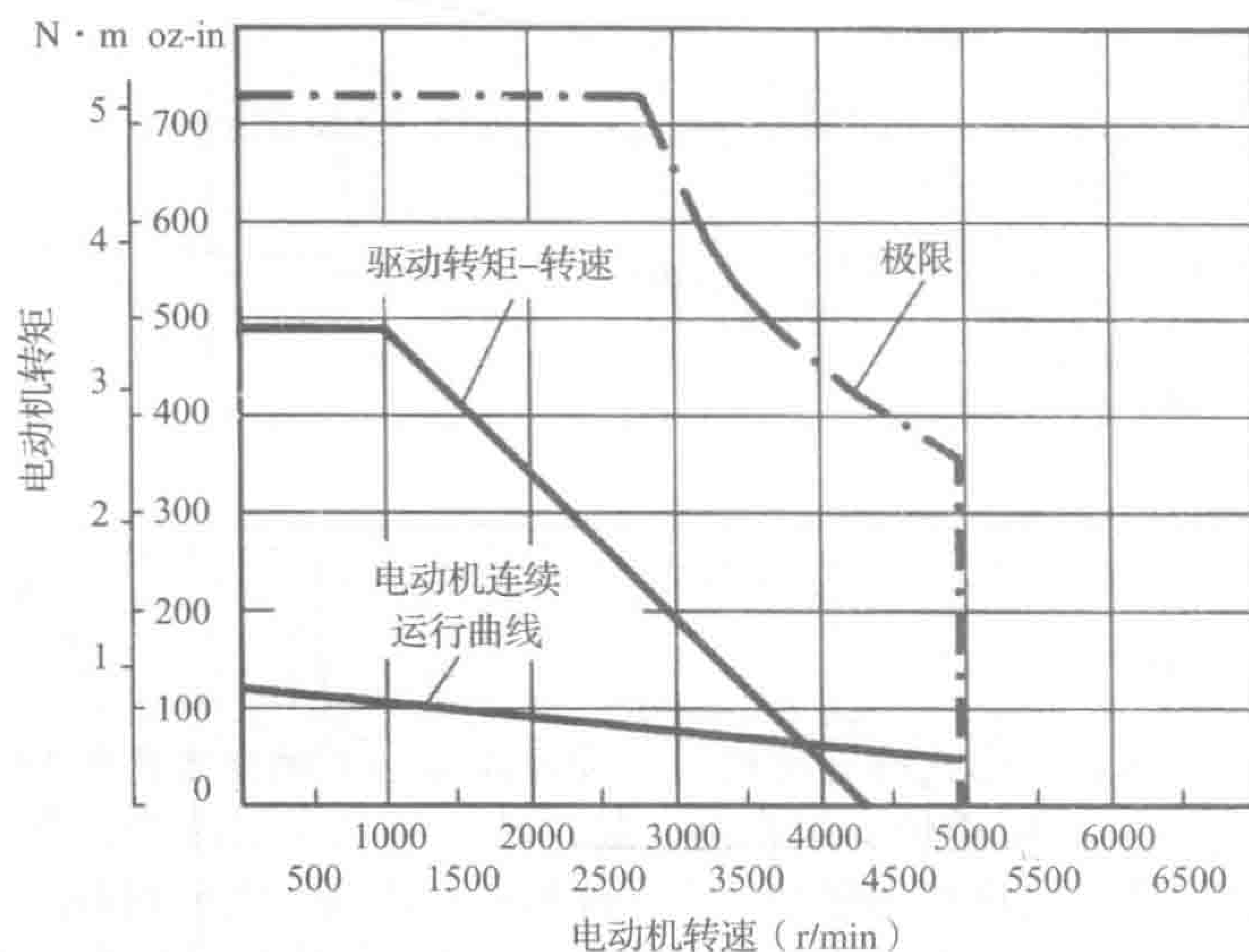


图 10-32 典型伺服电动机的特性曲线（由 Aerotech 公司提供）

- *电动机可以产生的最大转速是多少？*转矩–转速曲线中的零转矩点决定了电动机所能达到的最大转速。注意在此转速下，电动机不能对负载输出任何转矩。当电动机加载时，无法实现最大空载速度。
- *工作制是什么？*当电动机不是连续运行时，必须考虑系统的工作制。**工作制**定义为电动机实际运行时间与总运行时间的比值。如果负载需要较低的占空比，可以选择低功率电动机来达到额定的水平并且在重复开关时不会过热。
- *负载需要多少功率？*额定功率是电动机一个非常重要的参数。在知道负载所需功率要求的前提下，设计师应根据工作制选择一个有足够动力的电动机。
- *电动机的可用电源是什么？*电动机由交流还是直流电源供电是一个重要的决定。同样，如果使用电池供电，电池性能必须匹配负载要求。
- *负载惯性是什么？*如式(10-19)所示，为了快速的动态响应，较低的电动机转子和负载的惯性矩是理想的。当负载惯性较大时，唯一实现高加速度的方法是加大电动机尺寸以使其可以产生比稳态条件下负载要求的更大转矩。
- *负载能在恒速驱动吗？*实现恒速最简单的方法是选择一个交流同步电动机或直流并励电动机，这样可实现在相对大范围的负载转矩下保持一个相对恒定的转速。步进电动机和伺服电动机也可以运行在恒定且精确的速度下，但它们会涉及更多成本支出并且不适用于较大尺寸的电动机(如在工业场合应用的要求)。
- *需要准确的位置或速度控制吗？*在离散位置角定位和增量运动的情况下，步进电动机是一种不错的选择。步进电动机容易旋转并保持在离散的位置上。同时通过控制步率，它可以在较宽转速范围内工作。步进电动机可以在开环控制下运行，此过程无需传感器反馈。然而，如果你试图在较大的步率下驱动步进电动机或是负载转矩太大，步进电动机可能会打滑，而不能够执行预期的步数。因此，可以通过给步进电动机安装如编码器之类的反馈传感器来检查电动机是否正在以期望的速度运行。

对于一些复杂的运动要求，需要精确的位置或速度控制(如在机器中执行自动化应用程序)，伺服电动机可能是最好的选择。**伺服电动机**可以由交流、直流供电或无刷直流电动机与位置传感器装置相结合的(如数字编码器)。伺服电动机是由一个可编程的控制器驱动的，它能够处理传感器的输入并生成放大的电压和电流，以使电动机按照指定的要求运动。因为它包括传感器的反馈，所以这就是所谓的**闭环控制**。伺服电动机往往比步进电动机更昂贵，但它有更加快速且平滑的响应。视频演示 10.19 显

示了一个商用伺服电动机系统的典型组件，网络链接10.7提供了运动控制产品的供应商等资源。

对于小型机器人和业余爱好来说，RC伺服机构是一个不错的选择。RC伺服机构是一个具有电位器(检测转轴角度)和电子反馈的小型直流电动机，并通过PWM输入信号来完成位置控制。这种电动机最初开发出来后主要用在无线电或远程控制(RC)的模型飞机、汽车和船只上，它们已成为需要完成精确运动产品的通用组件。PWM信号的脉冲宽度决定了在有限运动范围内电动机的位置。当电动机接收到一定宽度的脉冲信号时，轴开始旋转并保持一定的位置，直到脉冲宽度发生变化。RC伺服机构也可以被优化以不同的速度连续双向旋转。网络链接10.8指向如何选择、使用、控制和修改RC伺服机构的相关资料。视频演示10.20和10.21为学生利用RC伺服机构完成项目系统的例子。

- *需要一个传动装置或变速箱吗？*通常负载需要低速、大转矩。因为电动机一般在高转速和低转矩情况下具有较好的性能，所以通常需要减速传动(齿轮箱或皮带传动)来将电动机的输出与负载需求进行匹配。**齿轮电动机**一词用来指将齿轮箱和电动机组装来打包销售。

当使用一个传动系统时，负载的有效惯性可以表示为：

$$J_{\text{eff}} = J_{\text{load}} \left(\frac{\omega_{\text{load}}}{\omega_{\text{motor}}} \right)^2 \tag{10-20}$$

其中，J_{eff}为电动机负载的有效极惯性矩，这个惯性和电动机转子惯性的总和可以代入式(10-19)中(即$J=J_{\text{motor}}+J_{\text{eff}}$)来计算加速度。式(10-20)中的速度比称为齿轮传动系统的**传动比**。它通常是指两个数字的比值，其中一个或两个数字是整数(当使用啮合齿轮时，两个齿轮具有整数数字的齿数)。所以一个齿轮的传动比有时写为$N:M$，也可以解读为$N:M$齿轮减速。这意味着电动机需要旋转N转才能驱动负载旋转M转，所以对于一个$N:M$的齿轮传动比来说，速度间的关系可以表示为：

$$\omega_{\text{load}} = (M/N)\omega_{\text{motor}} \tag{10-21}$$

- *电动机的转矩-转速曲线能够很好地与负载匹配吗？*如果负载具有较好的转矩-转速关系，则称为**"负载曲线"**，选择一个转矩-转速特性近似的电动机是很明智的。如果是这种情况，在大范围速度下电动机的转矩可以匹配负载的转矩，而速度的控制可以通过电动机电压的微小变化来实现。
- *当给定电动机的转矩-转速曲线和负载曲线时，如何计算电动机的转速呢？*如图10-33所示，当给定电动机的转矩-速度曲线和负载曲线时，电动机的转速就确定了。此外，工作点是可以自我调节的。在较低速度时，电动机转矩超过负载转矩并加速至系统工作点。但在更高速度时，当负载转矩超过电动机转矩时，速度降低至工作点。可以通过调节电动机的电压来改变工作转速，反过来它又改变了电动机的转矩-转速特性。

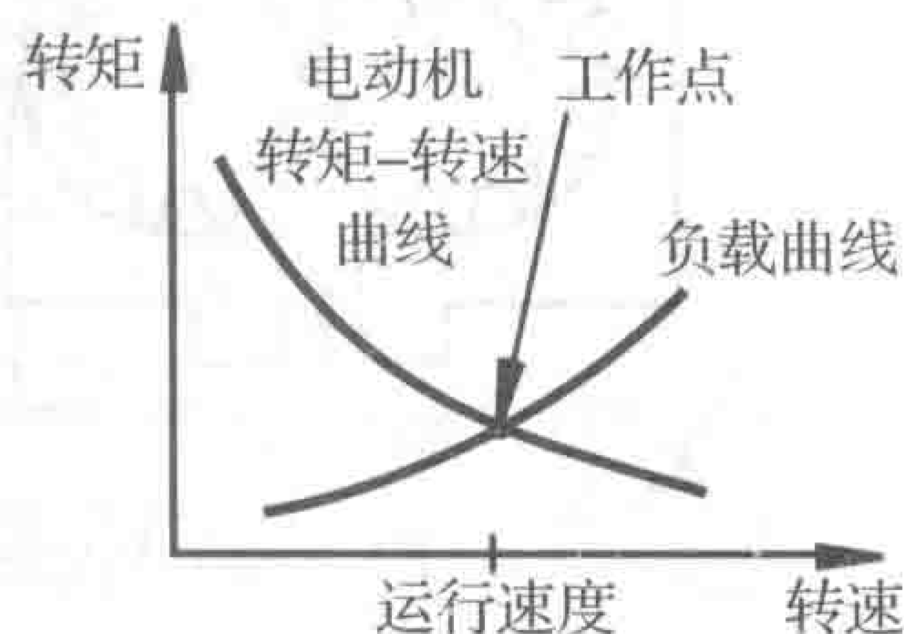


图10-33 电动机的工作转速

- *有必要反转电动机吗？*由于构造和电气控制，一些电动机是不可反转的，因此在选择电动机时需要考虑其两个方向的旋转。
- *电动机有尺寸和重量限制吗？*电动机可以是又大又重的，设计师在早期设计阶段需要意识到这一点。

课堂讨论项目10.6　电动机的尺寸

为什么在特殊应用时不能选用大尺寸的电动机是十分重要的？

课堂讨论项目 10.7　**电动机案例**

列出家用设备和自动化设备中不同类型的电动机。描述案例中电动机的类型。

10.8　液压系统

液压系统的设计是为了通过机电阀门来控制活塞与高压液体分布线，从而驱动大型负载。图 10-34 所示为一个液压系统，它通常由以下几个部分组成：传送高压流体的泵、限制系统压力的压力调节器、控制流量和压力的阀门、一个由软管或管道分布组成的系统及一个线性或旋转式的执行器。基础设施包括图中虚线框中包含的所有元素，它们通常是用于许多液压阀门执行机构的子系统。

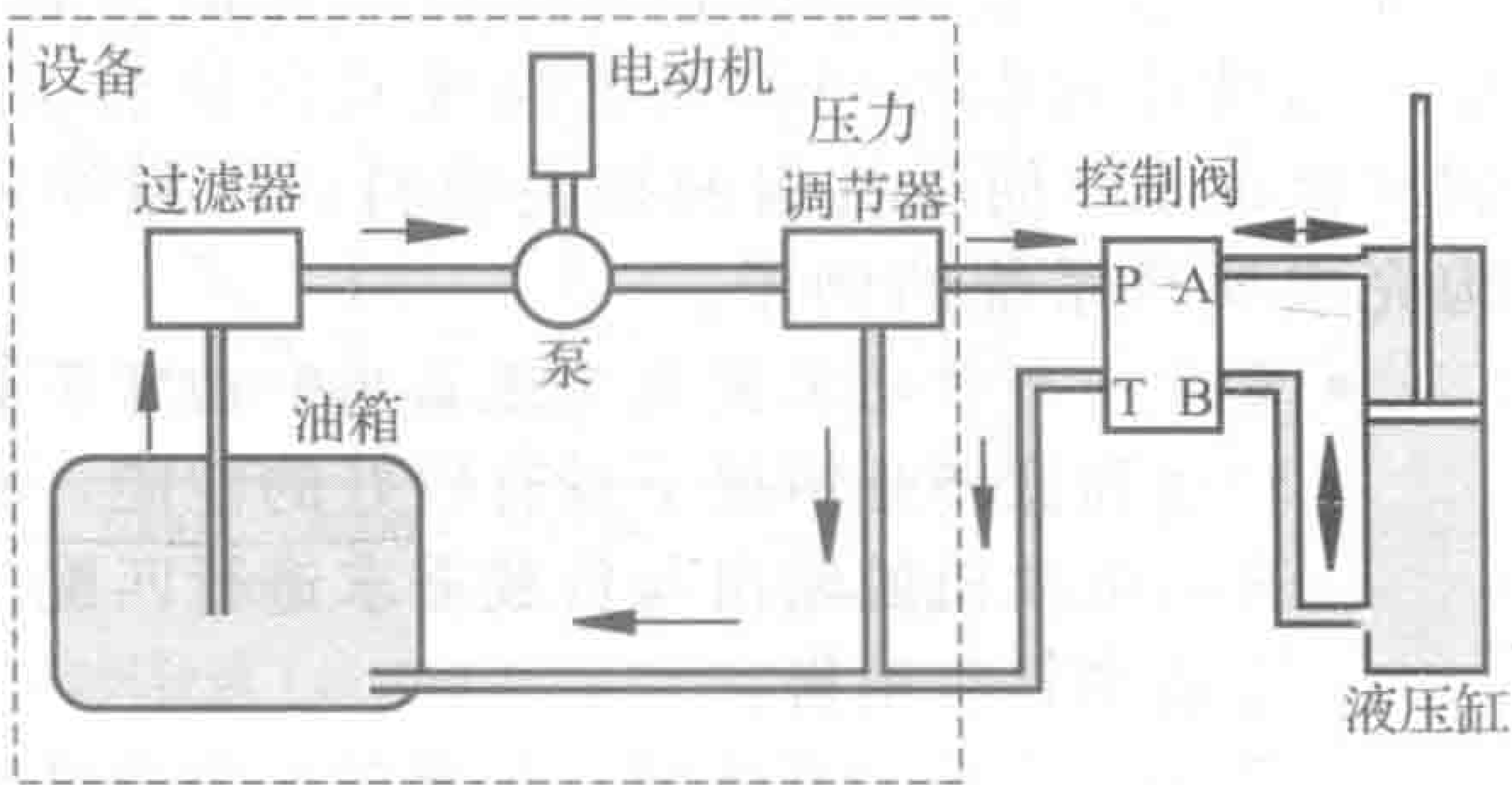


图 10-34　液压系统组件

液压**泵**通常是由电动机(如大型交流感应电动机)或一个内燃机驱动的。重型设备中所使用的压力泵(如施工设备和大型工业机器)需要产生的典型的压力在 1000psi (6.89MPa)至 3000psi(20.7MPa)的范围内。液压油的选择有以下几个特点：保证移动部件间有良好的润滑以防止磨损(如活塞和汽缸之间)、有耐蚀性及不可压缩性来提供快速反应。大多数液压泵为**容积式**液压泵，这意味着它们通过泵每个周期的运动与旋转来提供固定体积的流体。容积式液压泵有 3 种主要类型：齿轮泵、叶片泵及活塞泵。图 10-35 所示为一个**齿轮泵**，它们通过两个啮合齿之间的空间来运送流体。值得注意的是，啮合齿间形成了一个密封的空间，液体从一侧进入，并从另一侧流出。视频演示 10.22 和 10.23 描述了各种类型的齿轮泵。

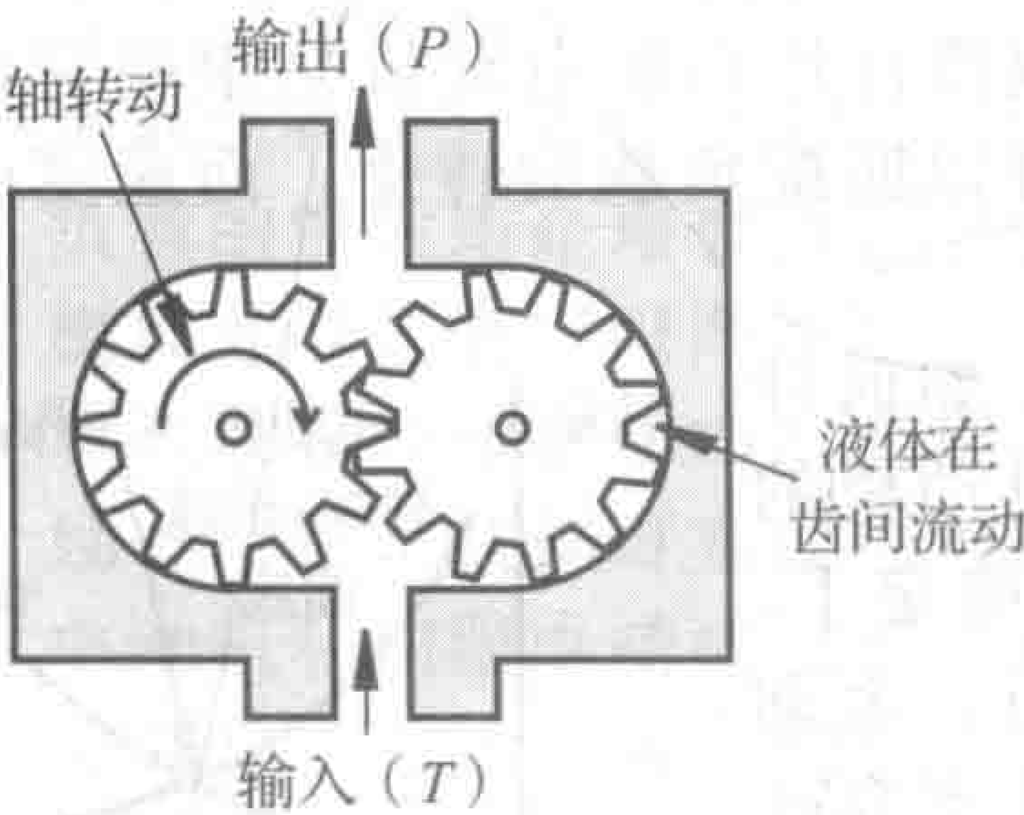


图 10-35　齿轮泵

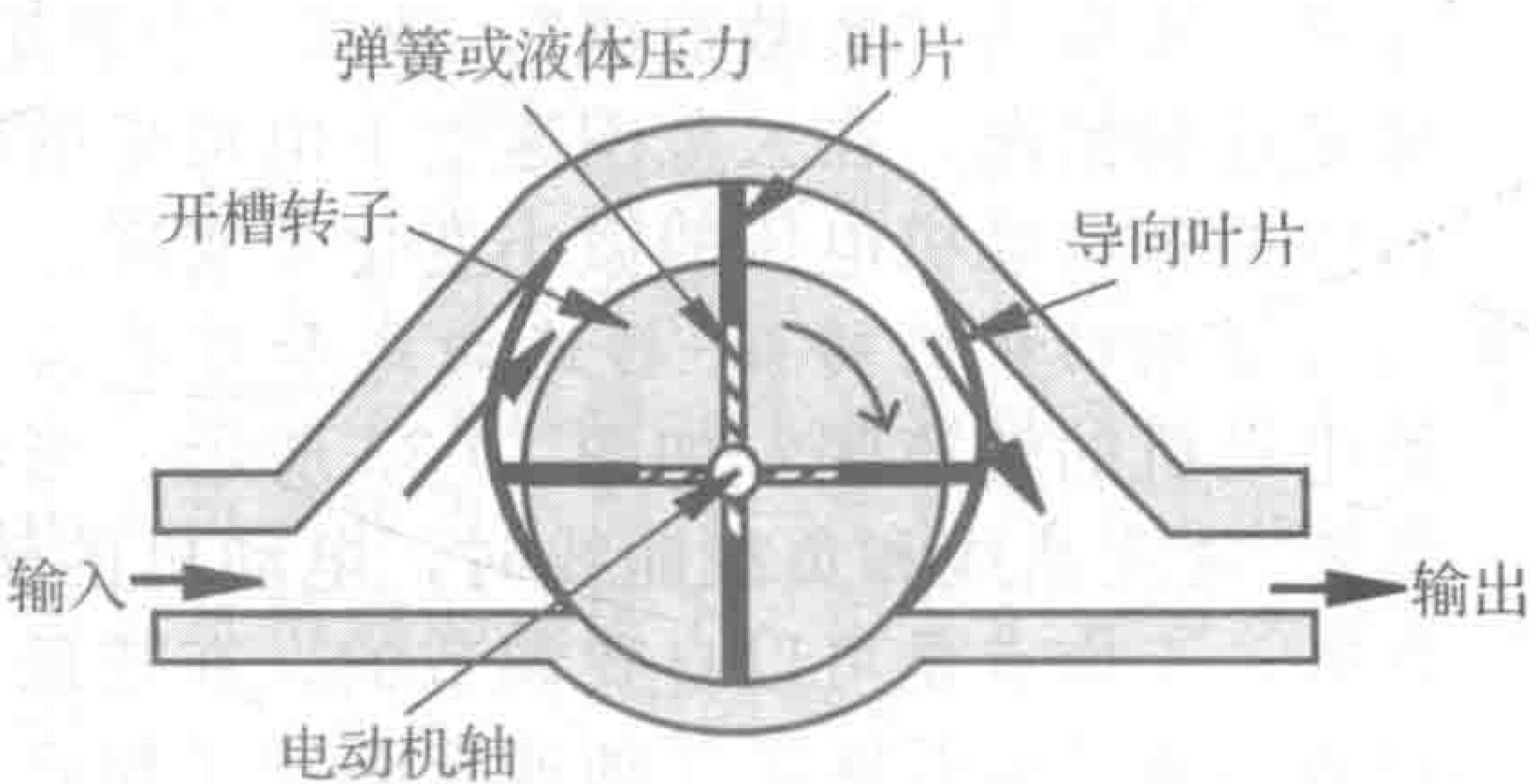


图 10-36　叶片泵

图 10-36 所示为一个**叶片泵**，它通过旋转叶片与顶盘之间的空间来传送液体。叶片的外廓引导叶片从一侧往另一侧运动，从而使得液体产生流动。通过调整顶盘相对于轴的位置可以输出不同的位移(固定的电动机速度)。

图 10-37 所示为一个**活塞泵**。缸体是由输入轴驱动旋转的，通过驱动活塞在固定斜板槽上旋转从而改变活塞相对于轴线的角度。活塞通过半个斜板时将流体吸进活塞泵，而另半个斜板将流体压出活塞泵。泵的位移可以通过改变固定斜板的角度加以调整。表 10-5 列出了不同类型泵的一般特征，并进行了比较。

因为容积式液压泵提供了固定的体积流量，因此在系统中必须有一个安全阀来充当**压力调节器**，以防止压力超过设计极限。最简单的压力调节器是图 10-38 所示的弹簧球。当压力超过弹簧力时，流体排回油箱，以防止压力的进一步增加。阈值压力或**破裂压力**通常

是通过改变弹簧的压缩长度来进行调整的，因此它是阻力。

表 10-5 泵的特征对比

泵的类型	位移量	典型压力[psi(MPa)]	成本
齿轮	固定	2000(13.78)	低
叶片	可变	3000(20.67)	中
活塞	可变	6000(41.34)	高

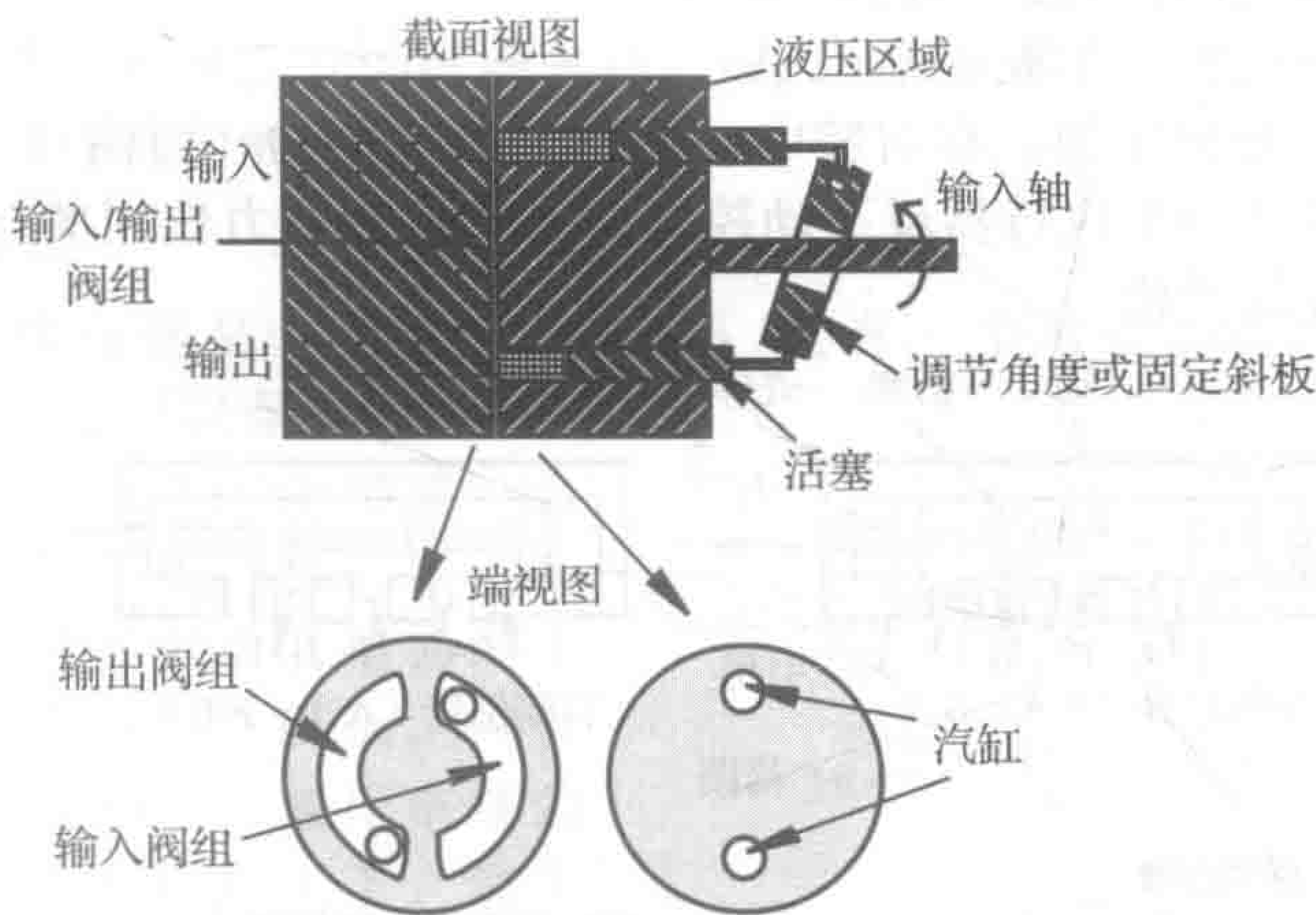


图 10-37 固定斜板活塞泵

10.8.1 液压阀

有两种类型的液压阀：**无限位阀**，可以通过调整开启和关闭之间的位置来调节流量或压力；**有限位阀**，通常只是打开和关闭，它为离散位置，每种状态提供不同的压力和流动条件。进口和与阀门相连接的出口称为**端口**。有限位阀通常通过 x/y 的标识来加以描述，其中 x 是端口的数量而 y 是位置的数量。如图 10-39 所示，4/3 阀具有 4 个端口和 3 个位置。在位置 1 时，系统向油箱排放压力；在位置 2 时，输出端口 A 增压，而端口 B 减压；在位置 3 时，输出端口 B 加压，而端口 A 减压。如图 10-40 所示，这个特殊的阀门用于控制一个双作用液压缸，其中 A 和 B 端口连接至汽缸的两端，通过活塞的运动来施加或释放压力。在位置 1 时，因为压力释放回了油箱，所以液压缸不移动。在位置 2 时，因为压力作用于活塞的左边，所以液压缸右移。在位置 3 时，因为压力作用于活塞的右侧，液压缸左移。

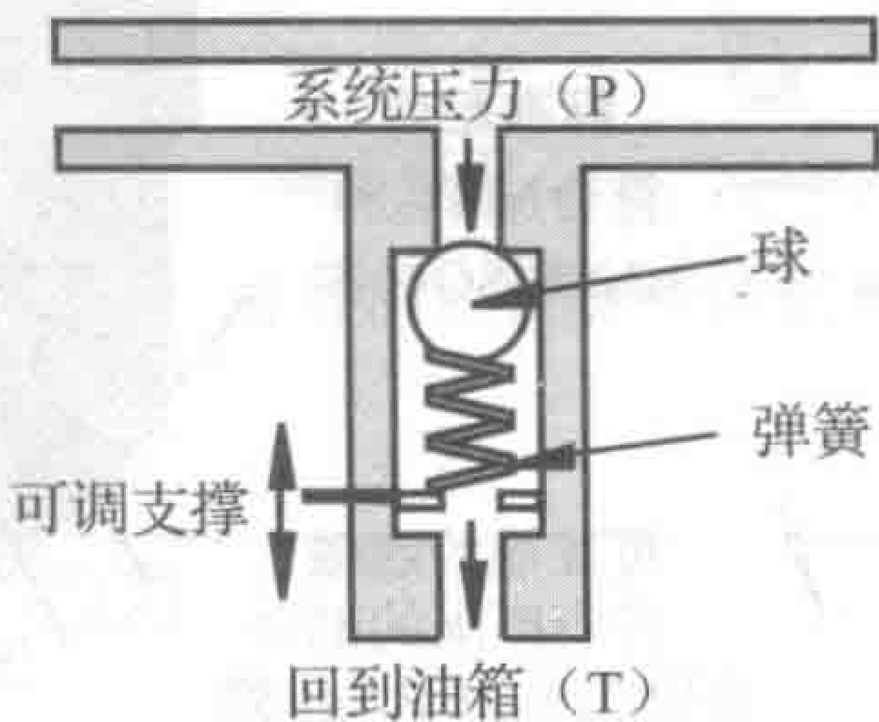


图 10-38 压力调节器

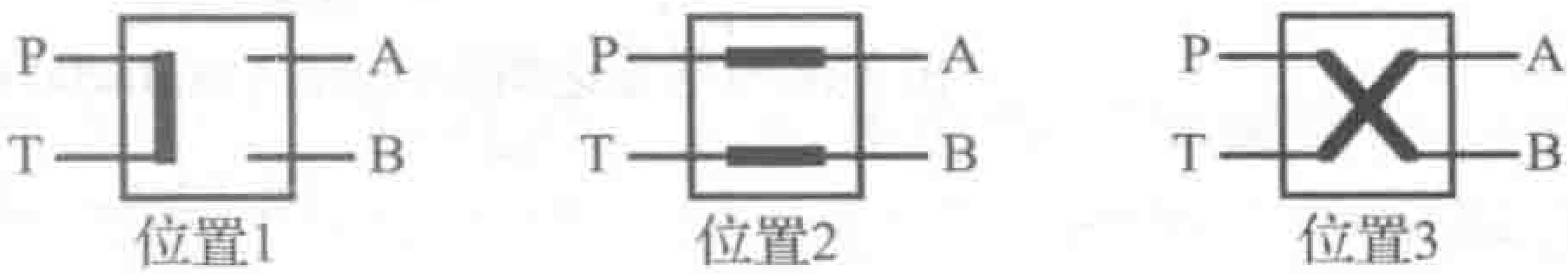


图 10-39 4/3 阀示意图

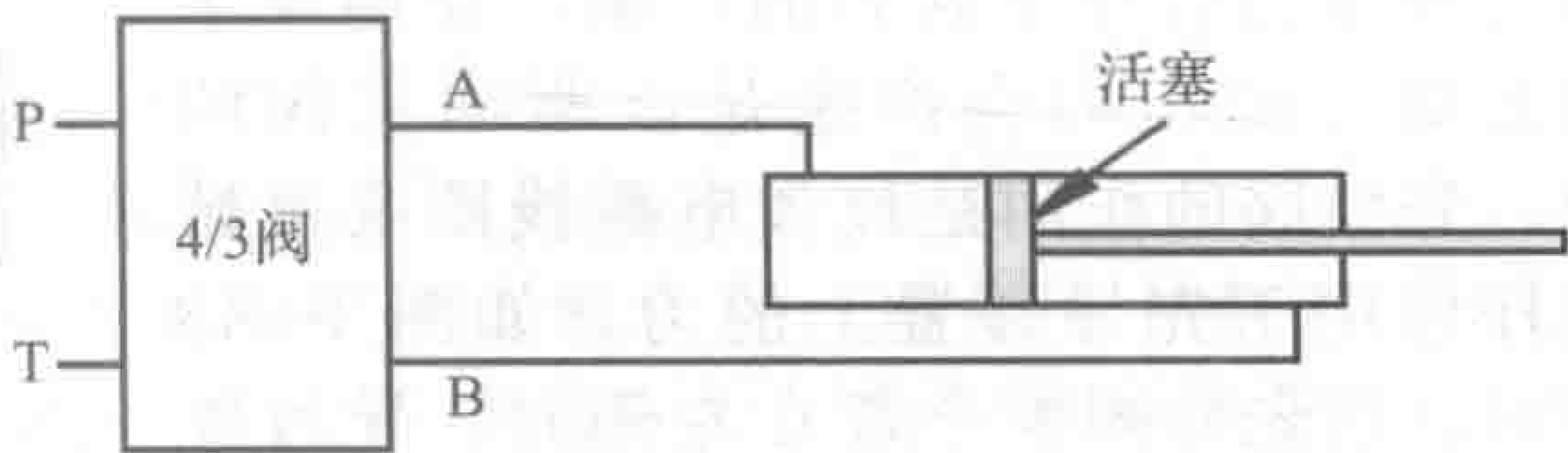


图 10-40 双作用液压缸

常见的定位阀类型包括：止回阀、提升阀、换向阀及回转阀。图 10-41 所示为止回阀和提升阀。**止回阀**只允许液

体向一个方向流动。**提升阀**是一个允许反向流动的止回阀。

如图 10-42 所示，**换向阀**由一个在有多个端口的圆柱壳内移动的带有波瓣的圆柱形卷轴组成。卷轴可以来回移动，使卷轴波瓣间的空间对准，从而使输入和输出端口间相连，以便让高压流向系统中的不同管道。当静态压力与波瓣的反向压力相同时，卷轴平衡在相应的位置。因此，不需要力来保持相应的位置。左腔中端口 A 是加压的，而端口 B 是泄压的；在右腔中，端口 B 是加压的，而端口 A 是泄压的。通常，位置之间的移动是需要一个执行器或手动控制杆来产生轴向力作用的，这一作用力可以克服流体动力与动量流的变化。

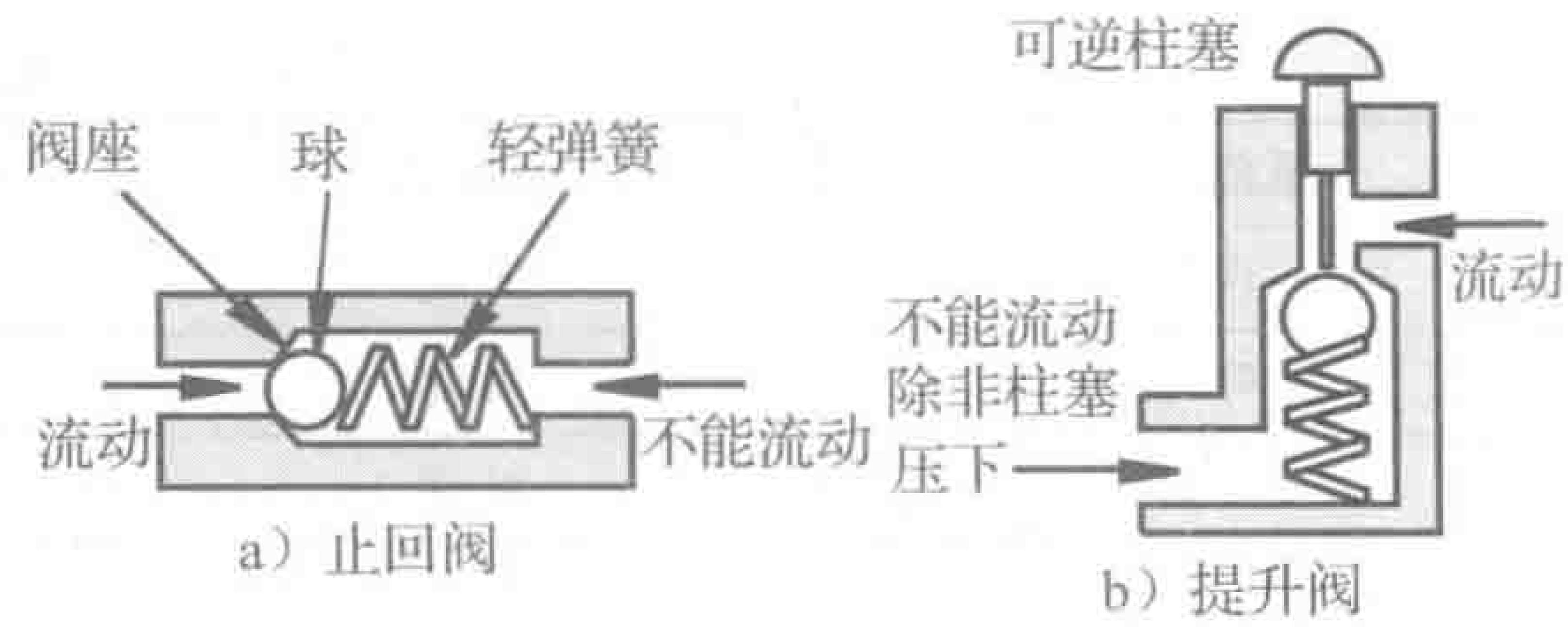


图 10-41 止回阀与提升阀

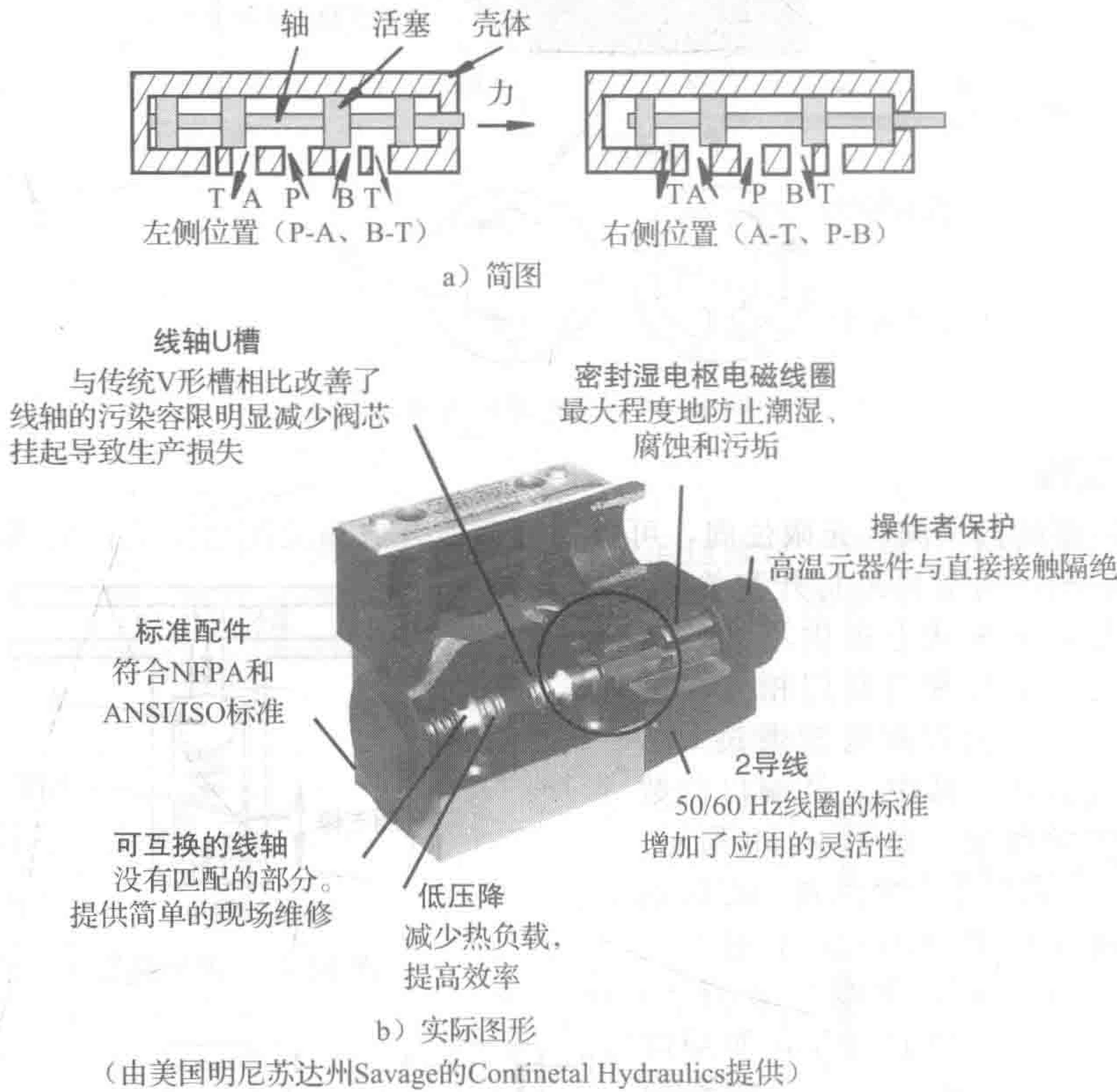


图 10-42 换向阀

如图 10-43 所示，在一个需要较大流体动力的管阀设计过程中，通常需要添加一个**先导阀**。先导阀运行在一个较低的压力下，它称为**先导压力**，同时这种情况下的流量也较低，因此需要很少的驱动力。先导阀将先导压力引导至阀芯的一侧，作用在主阀芯瓣上的压力会产生足以驱动主阀的力。先导阀的作用是放大电磁线圈或机械杠杆作用于先导装置上的力。如图 10-43 所示，当先导阀腔全部在左侧时，导致先导压力位于左侧，右侧开始泄压，因此驱

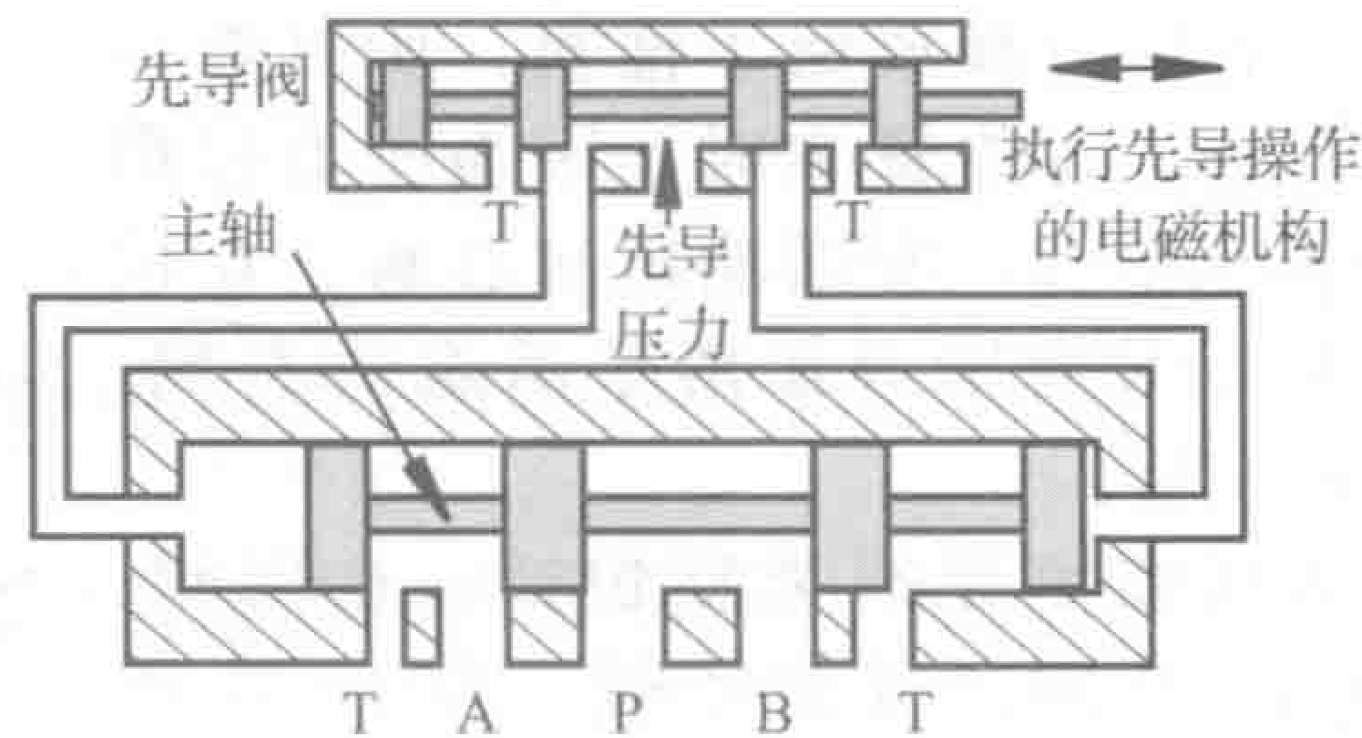


图 10-43 先导操作阀

动主腔体向右移动。这个主要适用于端口B和端口A。视频演示10.24说明了如何使用先导阀来产生一个液压放大力。

到目前为止，对换向阀的讨论只限制在两个位置之间的操作：打开和关闭。连续操作则可以通过使用**比例阀**来实现，其轴的移动距离与机械或电气输入成正比(如杆或可变电流的电磁线圈)，从而改变流速，并调节执行器的速度和压力。当通过电磁线圈来控制轴的位置时，比例阀称为**电液阀**。这些阀可用在没有反馈情况下的开环控制中，但通常需要使用传感器来监测轴的位置或执行器的输出。配备传感器和控制电路的比例阀通常也称为**伺服阀**。电液阀通常是先导式操作的，电磁线圈驱动先导轴，进而控制轴的位置。先导轴可以由一个电磁弹簧或一组对立的线圈驱动。流过电磁线圈的电流及所产生的位移可通过与模拟或数字控制器连接的放大器来控制。

10.8.2 液压执行器

最常见的液压执行器是一个简单的**汽缸**，它有一个通过加压流体驱动的活塞。如图10-44所示，液压缸可以是**单作用**的，通过压力来驱动并保持在一个位置，再由弹簧或自重运动到其他位置；或者是**双作用**的，压力是用于驱动活塞在两个方向上的运动。如图10-45所示，线性执行器可以实现很多动作。液压电梯的汽缸运动直接驱动了电梯的上下。液压剪刀将水平方向上较小的直线运动转换为垂直方向上较大的直线运动。起重机液压缸的线性运动转化为了铲斗的翻转。

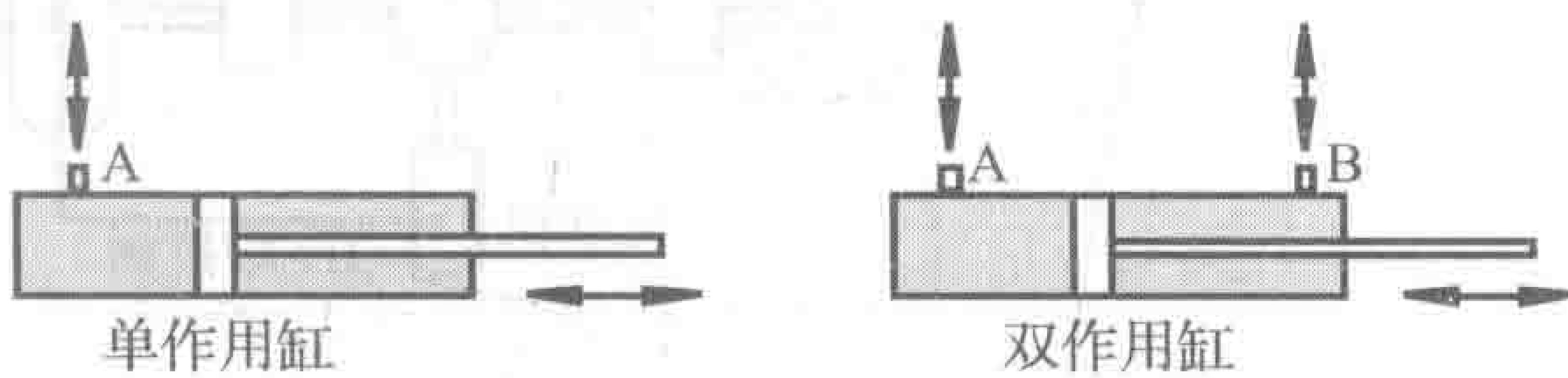


图10-44 单作用和双作用汽缸

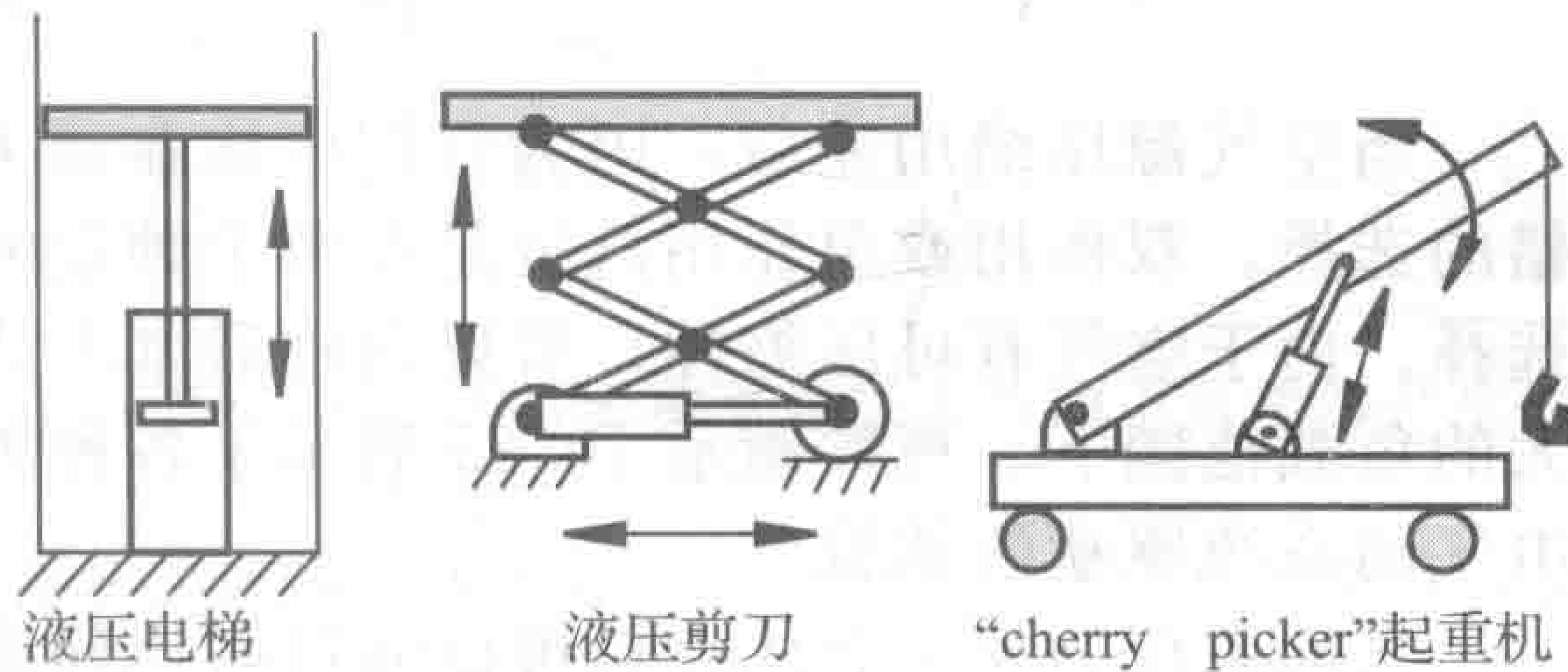


图10-45 通过液压缸驱动的机械原理

旋转运动也可以直接通过带有旋转执行器的液压系统来实现。一种旋转执行器，称为齿轮马达，它是一个齿轮泵(如图10-35所示)在受到压力时反向驱动，从而导致了轴的旋转。

课堂讨论项目10.8　双作用液压缸产生的力

当给定一个系统压力时，由双作用液压缸产生的力的不同决于驱动方向吗？那么力如何决定每个运动的方向？

液压系统具有利用非常紧凑的执行器产生很大力的优点。它们还可以在低速时提供精确控制，并具有由液压缸所决定的内置行程限制。液压系统的缺点包括：需要大型基础设施(高压泵、油箱和分布线)；液体泄漏的可能(这不是一个清洁工作环境所欢迎的)；高压力所可能带来的危害(如破裂)；运行噪声；振动及相应的维护要求。也正是由于这些缺点，电动机驱动通常是首选。然而，在大型系统中，特别是需要非常大驱动力的场合，液压是唯一的选择。网络链接10.9提供了液压组件和系统的在线资源和制造商信息。

10.9 气动系统

气动系统与液压系统相似，但是它们使用压缩空气作为工作流体而并不是液压油。图10-46所示为一个气动系统的组件。压缩机用来提供压缩空气，通常压力在70～150psi (482kPa～1.03MPa)之间，此压力值远远低于液压系统的压力。由于具有较低的操作压力，因此气动执行器产生力也远低于液压执行器。

当输入气体被压缩后，使用一个空气处理单元从空气中清理掉多余的水分和热量(见图 10-46)。与液压泵在高压力需求下提供容积液体所不同的是，压缩机不能相应地提供大量的压缩空气。因此，大量的高压压缩空气存储在一个储气罐中。输入到系统中的工作压力可以通过压力调节器来调节，以使其远低于储罐压力。储罐同时配有压敏开关，当内部压力低于预期水平时，开关激活压缩机开始工作。控制阀门和执行器与液压系统的相应部分相似，但不同的是液体流回油箱，而气体则是简单地回到大气中。气动系统是开环系统，总是处理新的空气，而液压系统是闭环系统，总是循环处理相同的油。这点就使在气动系统中没有设计回路系统的必要了。气动系统的另一个优点是：空气比油“干净”，虽然空气没有液压油的自润滑特性。

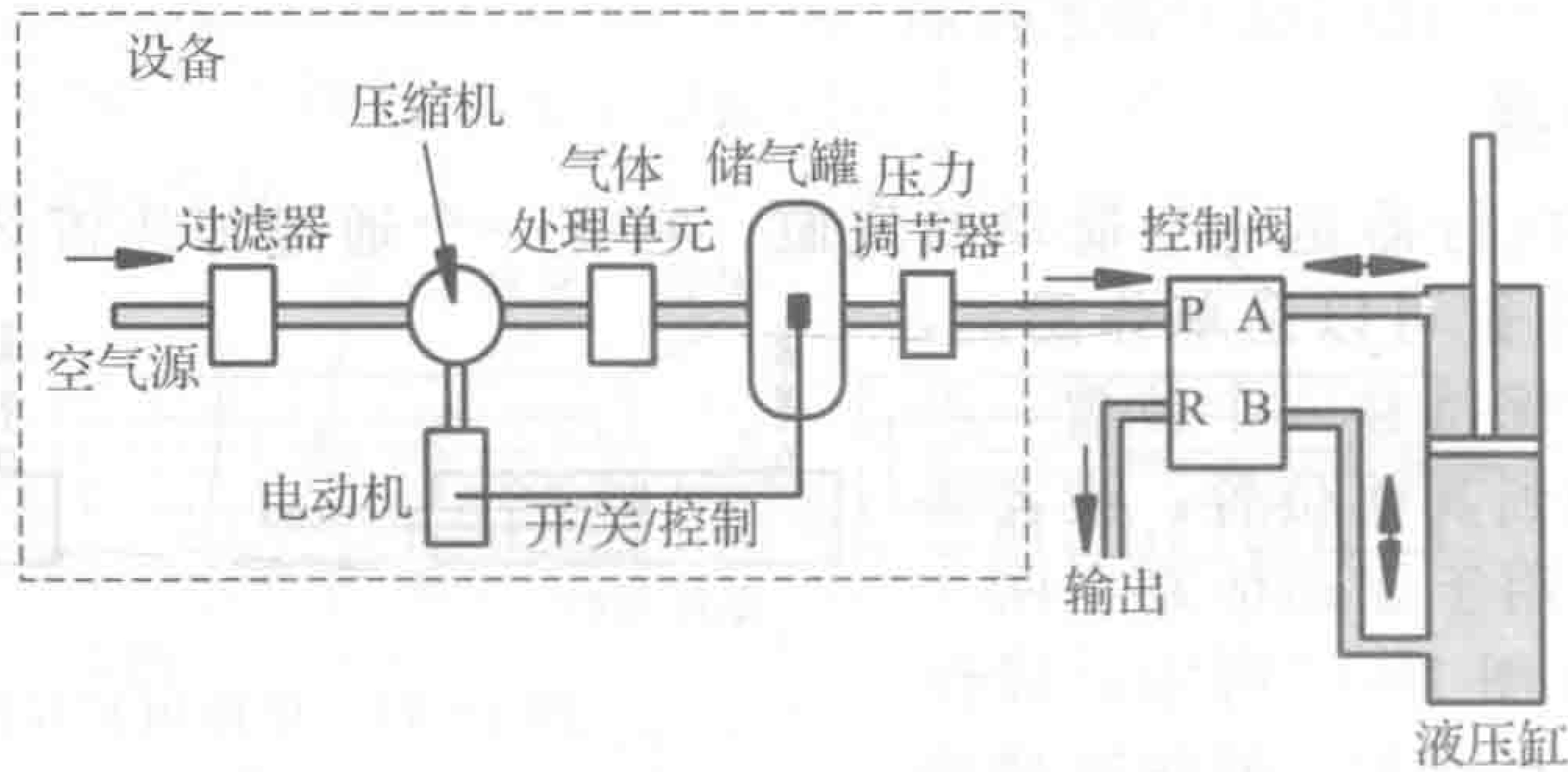


图 10-46　气动系统组件

当空气源压缩用完后，因为它们往往在有关的工程设施中，因此气动执行器是一个不错的选择。双作用或单作用汽缸是在两个预设的端点间提供小作用力线性运动的一个理想选择。由于空气有可压缩性，所以汽缸通常不适用端点之间准确的运动场合中，尤其在较大的负载范围下。视频演示 10.25 展示了各种类型的气动缸，视频演示 10.26 展示了一个由气动系统驱动的装置。

气动系统的另一个优点是可以通过高压储罐和调节装置来取代基础设施。储罐机构的作用类似于电气系统中的电池。这使得质量轻且可移动的气动系统成为可能(如气动驱动行走的机器人)。在这些应用中，储罐的容量限制了系统的范围或操作时间。

问题和练习

10.1　电磁线圈可以建模为一个电感串联一个电阻。设计一个电路通过数字输出控制一个 24V 的电磁线圈。

10.2　为什么电动机和电磁线圈的存在会影响附近的电子电路?

10.3　如果制造商的永磁直流电动机的规格如下，当电源电压为 10V 时，电动机的空载速度、失速电流、起动转矩和最大功率是多少?

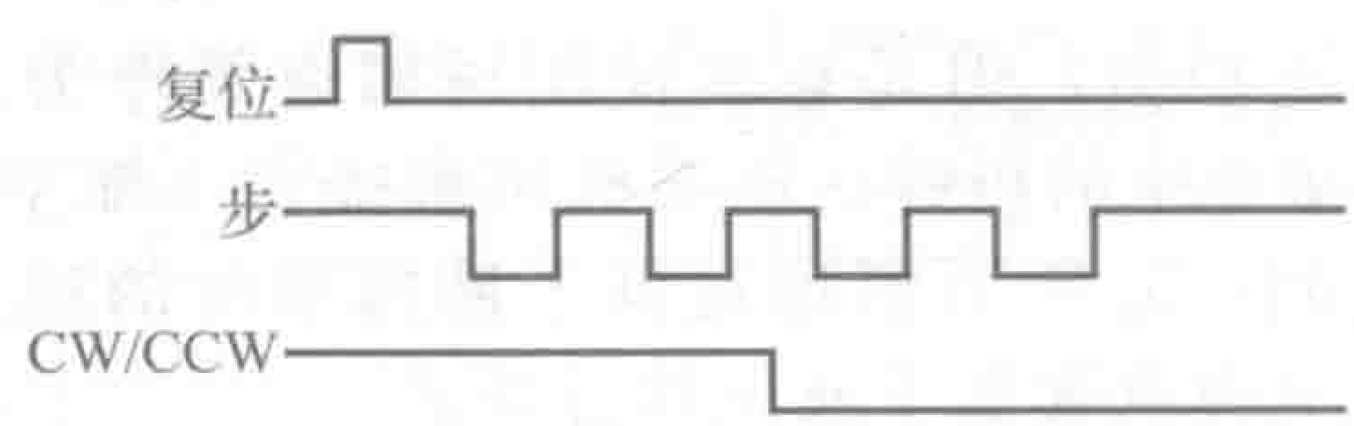
a. 转矩常数为 0.12N·m/A

b. 电常数为 12V/1000r/min

c. 电枢电阻为 1.5Ω

10.4　认识到设计实例 10.1 中的 H 桥芯片包括一个电流输出，画出使用这个芯片对直流有刷电动机转矩控制的框图。(提示：H 桥输出电流值为 377mA，将此电流转化为电压，并使用它作为脉宽调制芯片 LM3524D 的输入。包括 LM3524D 上的转矩调整电位器。)

10.5　如图 10-29 所示的全步驱动电路，通过添加信号 B_0、B_1、ϕ_1、ϕ_2、ϕ_3、ϕ_4 来完成以下时序图。通过使用表 10-1 来验证预期的运动结果。



10.6 给出课堂讨论项目 10.5 完整和彻底的答案。

10.7 对于一些制造商来说，单极步进电动机驱动电路可以作为一个单独的组件。在因特网上搜索一个步进电动机驱动器，记录其标记图，并指出如何使其正确地与一个步进电动机连接。

10.8 设计师希望使用步进电动机与齿轮箱相配对来驱动一个传送带，以实现线性移动 1mm 或最高速度为 10cm/s。齿轮箱是一个齿轮比为 3∶1 的减速机齿轮，传送带是由 10cm 鼓连接到变速箱的输出轴实现的。那么步进电动机所需的最小分辨率是多少？同时，达到最大速度时步率是多少？

10.9 为下列的每个应用选择一个最佳的电动机类型，并说出相应的理由。

a. 机械臂关节

b. 吊扇

c. 电车

d. 圆锯

e. 数控铣床

f. 电动起重机

g. 硬盘驱动器

h. 磁盘驱动电动机

i. 挡风玻璃刮水器电动机

j. 工业输送机电动机

k. 洗衣机

l. 干衣机

10.10 永磁直流电动机通过与变速箱配对可以达到输出一定的载荷。如果转子的极转动惯量和负载的分别是 J_r 与 J_l，变速箱有 $N:M$ 的减速比($N>M$)，电动机的起动转矩为 T_s，空载转速为 ω_{max}，并且负载转矩与速度成正比($T_l=k\omega$)。

a. 在该负载下电动机的最大加速度是多少？

b. 电动机的稳态速度和负载是多少？

c. 要多长时间才能到达 95%的稳态速度？

10.11 给出课堂讨论项目 10.8 完整和彻底的答案。

10.12 内径为 1in(1in=0.0254m)的单作用液压缸在 1000psi(6.89MPa)的流体压力作用下所能够产生的最大力是多少？

10.13 如果一台机器需要通过一个内径为 1cm 的单作用液压缸来生产 2000N 的力，那么系统要求的最低压力是多少？

10.14 假设你正在设计一个需要使用气动阀的气动系统。在因特网上搜索一个能够处理 100psi(0.689MPa)的气动阀的规格，并画一个示意图来显示其如何与数字系统相连接的。

10.15 假设你正在设计一个使用双作用汽缸的气压传动装置来产生 100lbf(444.822N)，并使用 2000psi(13.78MPa)的压缩空气作为一个压力源。以框图形式指定系统中所需的组件，并尽可能使其规范化。

参考文献

Kenjo, T., *Electric Motors and Their Controls,* Oxford Science Publications, Oxford, England, 1994.

Khol, R., editor, "Electrical & Electronics Reference Issue," *Machine Design,* v. 57, n. 12, May 30, 1985.

McPherson, G., *An Introduction to Electrical Machines and Transformers,* John Wiley, New York, 1981.

National Semiconductor Corporation, "National Power ICs Databook," 2900 Semiconductor Drive, P.O. Box 58090, Santa Clara, CA 95052.

Norton, R. L., *Design of Machinery,* 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2003.

Shultz, G. P., *Transformers and Motors,* Macmillan, Carmel, IN, 1989.

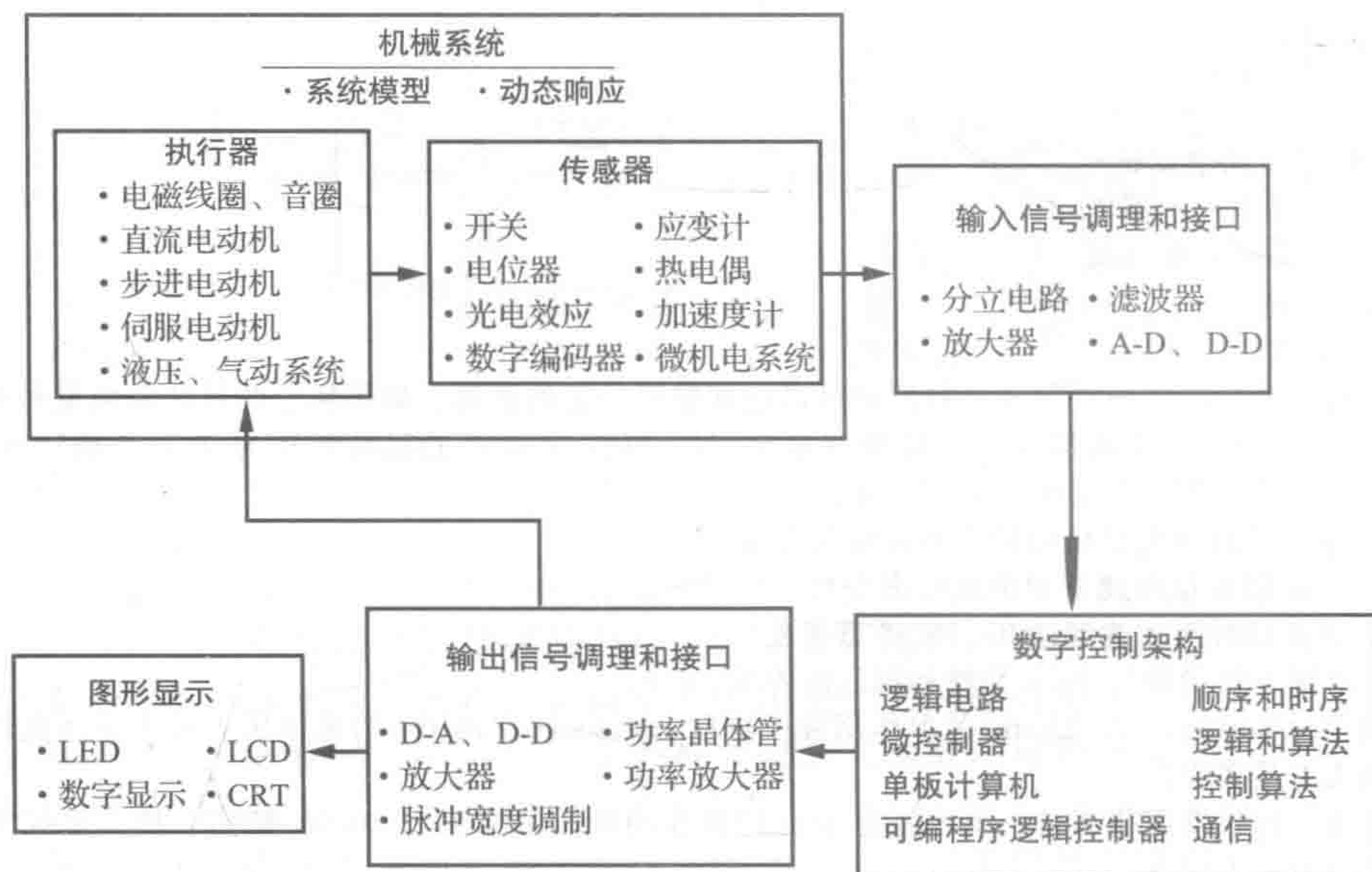
Westbrook, M. H. and Turner, J. D., *Automotive Sensors,* Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 1994.

Williamson, L., "What You Always Wanted to Know About Solenoids," *Hydraulics and Pneumatics,* September, 1980.

第11章

机电一体化系统——控制架构和案例研究

本章对机电一体化系统数字控制体系结构进行了总结，介绍了PID控制的概念，并给出了3个机电一体化系统设计的研究案例。



本章目标

当你阅读、讨论、研究并应用了本章的内容后，能够：

1. 了解为什么今天许多工程设计可以用机电一体化系统来区分；
2. 了解在机电一体化系统设计中各种类型的控制体系结构；
3. 了解反馈控制系统的基本原则；
4. 根据机电一体化系统的有限规范来完成多种设计；
5. 运用梯形图来理解可编程序逻辑控制器(PLC)的基本编程过程；
6. 认识许多在航空航天、汽车和消费产品中的机电一体化系统。

11.1 引言

在本书前面的章节中，介绍了将机械设备、传感器、信号和电力电子整合为机电一体化系统的基本知识。在本章中，通过一些机械电子设计的例子来帮助你将理论分析与实际应用相结合，并进一步拓展知识和设计技能。为了将最先进的机械装置、传感器、信号和电力电子应用到最先进的机电一体化系统中，必须涉及基于微处理器的控制系统。第7章介绍了基本的微控制器编程和接口。在这里将简要介绍一些可用于机电一体化系统设计的其他控制系统的架构。然后介绍了3个完整的机电一体化系统的案例：一个肌电控制机械手臂、寻常环境下运动的关节式步行机和硬币计数器。这些项目作为科罗拉多州立大学机械电子工程的课程设计内容。同时也列出了机电一体化系统在许多工业领域的应用案例。

11.2 控制架构

许多机电一体化系统是多输入和多输出的，输入与输出间存在确定性关系，从而引起系统产生某种形式的控制输出。从简单的开环控制到复杂的反馈控制，设计人员有一个大范围的控制架构可供选。控制可以简单到仅使用单个运算放大器加以实现，也可以复杂到使用可编程大规模并行微处理器来实现。在这里，将介绍一个你可以在机电系统设计中使用的基本控制方法的层次结构。

11.2.1 模拟电路

许多简单的机电设计需要一个基于模拟输入信号的特定的执行器输出。在通常情况下，模拟信号处理电路由运算放大器和可以影响控制的晶体管组成。放大器可用于执行比较和数学运算(如模拟、减法、积分和微分等)。它们也可以用于线性控制执行器的放大器。模拟控制器通常设计简单、易于实现，同时比基于微处理器的系统要便宜。

11.2.2 数字电路

如果输入信号是数字或可以转化成一组有限的状态分量，那么组合或时序逻辑控制器可能是实现机电设计的较好选择。最简单的是使用一些数字芯片来设计数字控制器。为了在一个集成电路上产生复杂的布尔函数，特殊的数字化设备[如**可编程序阵列逻辑**(PAL)控制器和**可编程序逻辑阵列**(PLA)]可以用来降低设计的复杂性。PAL 和 PLA 由许多可以连接到一个定制编程设备的逻辑门和晶格层导体组成。一旦设定，芯片可以实现设计好的输入和输出之间的布尔函数关系。对于需要多个集成电路的复杂的时序和组合逻辑电路 PAL 和 PLA 可以提供替代方案。

另一种类型的可编程逻辑设备是**可编程序逻辑门阵列**(FPGA)。像 PAL 和 PLA 一样，一个 FPGA 包含大量可以通过编程实现逻辑功能的可重构门。FPGA 不同于 PAL 和 PLA，因为它也可以在微控制器中内置内存、I/O 端口、算术功能及其他功能模块。此外，FPGA 通常与一些高级软件编程语言连接(如 VHDL)以实现相对复杂的功能。视频演示 11.1 显示了一个用于控制简单装置的 FPGA 开发系统示例。

有时它可以用来设计一个既物美价廉又能提供独特功能的**专用集成电路**(ASIC)。通过简单的 ASIC 即可以实现逻辑功能、存储、计算、信号处理及其他数字和模拟功能。它的设计和生产可能是昂贵的，但在大批量生产应用的背景下，从长期来看，一个 ASIC 产品是便宜的。ASIC 也有吸引人的地方，因为它可以变得尺寸更小并且消耗更少的能量。

11.2.3 可编程序逻辑控制器

可编程序逻辑控制器(PLC)是连接和控制模拟及数字设备的专业工业设备。它们具有一个小指令集以应用于工控应用程序中。它们通常通过梯形逻辑来编程，这种编程方法是一个在系统输入和输出之间放置连接和逻辑的图形化方法。PLC 设计用于特定的工业控制场合和工业环境下。因此除了灵活和易于编程外，它们是可靠的且相对不受外界干扰。

图 11-1 所示为定义和建立梯形图的符号、注释及基本构造。对 PLC 编程是一种简单地通过交互式地拖曳组件来完成设计的图形用户界面。在梯形图中，两侧的母线代表电源(左侧)和地(右侧)，梯级代表电流通路(从左到右)到输出设备。一个**输入**通常是开关或接近传感器，它通常由**常开**(NO)或**常闭**(NC)继电器图标来表示。输入可以通过串联或并联的方法来表示各种逻辑功能。**输出**包含梯级右侧的响应，当梯级左侧输入继电器响应被激励时会导致电路闭合。输出可以是电动机、加热器、灯、电磁线圈或其他控制装置。一个输出状态也可以用作输入继电器来控制梯形图中其他梯级。定时器和计数器等特殊功能也

可以创建时序、停止和重新启动一系列事件。

在图 11-1 中，只有当常开输入 I_1 关闭时，输出 O_1 才激发。I_2 是常闭输入，当 I_2 打开时输出 O_2 关闭。只有当常开输入 I_3 关闭**或**常开输入 I_4 关闭时，输出 O_3 才激发。只有当常开输入 I_5 关闭**与**常开输入 I_6 关闭时，输出 O_4 才激发。O_5 回路称为**自锁电路**，当常开输入 I_7 关闭时，它才触发。此外，一旦触发，输出就会处于激活状态，即使输入 I_7 返回到打开状态，直到常闭输入 I_8 打开。上述过程也可以通过使用输出信号作为额外的输入(称为**输出继电器**)或触发输入 I_7 而获取。术语“自锁”得到应用的原因在于输出打开状态被维护(存储)，直到第二次输入 I_8 将其复位。最后两个梯级展示了如何使用一个计时器。当常开输入 I_9 关闭时，启动一个计时器。当定时器达到预定的时间时，定时器输入关闭，输出 O_6 激发。

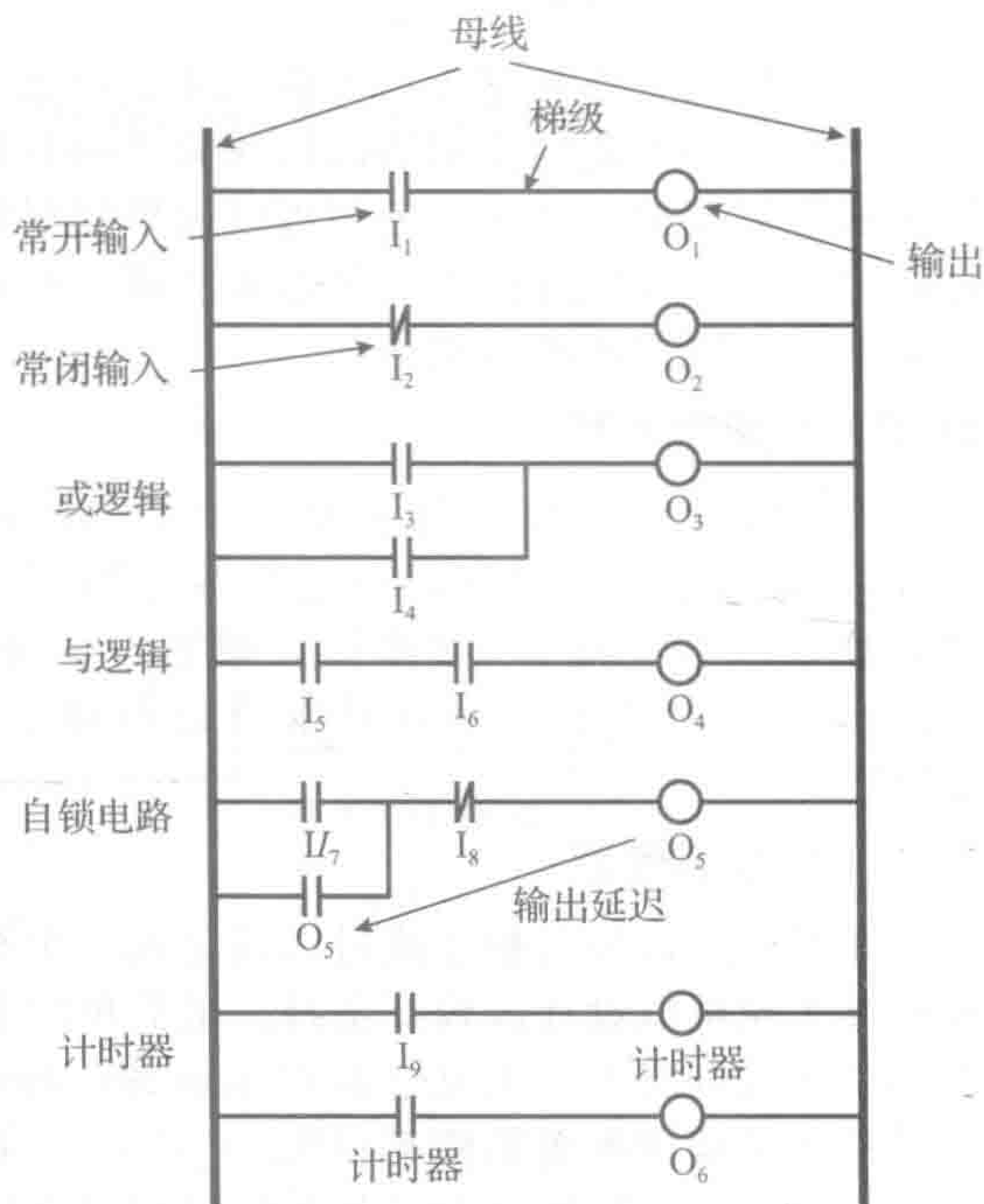


图 11-1 逻辑图和基本功能

图 11-2 所示为一个公共组装线控制系统的梯形逻辑图，在此系统中电动机或双作用气动或液压缸基于触发事件完成相应驱动动作(如通过传感器探测到传送带上某个部件的来回运动)。限位开关或传感器在每个方向上检测所需执行器预期的结束行程。这就是事件的顺序：当常开的“触发”输入命令关闭时，执行器将驱动前进。自锁电路将维持这一前进运动，直至常闭的“终点极限检测”输入信号的状态发生变化。这将在第一阶梯打开常闭的“终点极限检测”输入信号，并在第二梯级开始的时候关闭常开的“终点极限检测”输入命令，然后启动计时器。当定时器达到预定时间后，第三个梯级被触发使得执行器开始反转，直到检测到常闭的“起点极限检测”信号。总之一旦信号被触发，执行器将一直向前运行直至检测到结束行程信号，然后在执行器返回起始位置之前系统停止工作。

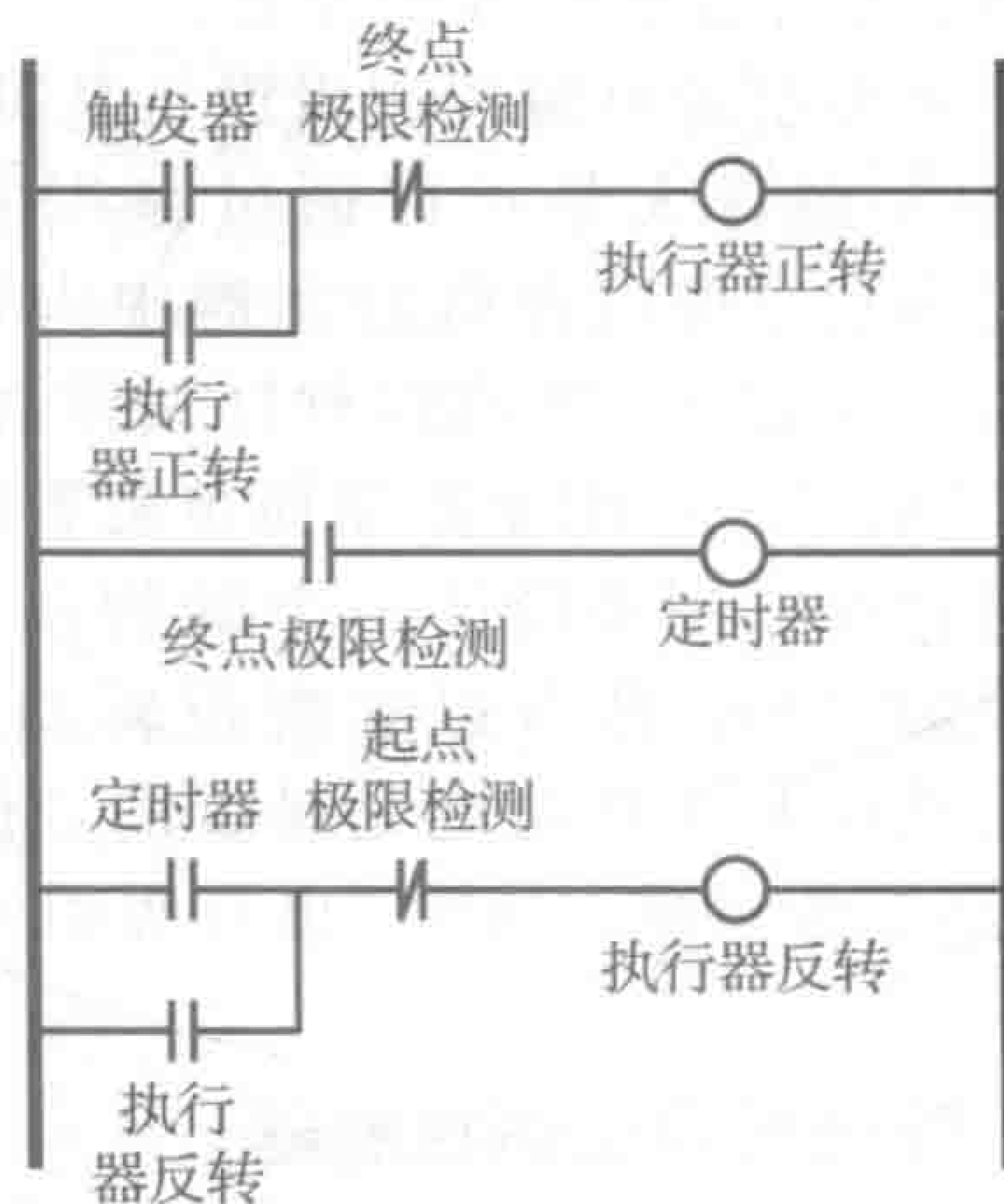


图 11-2 电动机的梯形逻辑控制周期

视频演示 11.2 为 PLC 开发系统的案例，演示了如何使用梯形逻辑图来创建一个液位控制系统。视频演示 11.3 展示了一个学生使用 PLC 完成的项目。网络链接 11.1 提供了各种 PLC 产品的在线参考资料和制造商链接。网络链接 11.2 提供了关于各种 PLC 的话题讨论。

11.2.4 微控制器和数字信号处理器

微控制器作为单一集成电路的微型计算机能够提供小型、灵活的控制平台，并可以容易地嵌入到一个机电一体化系统中。微控制器可以通过编程来执行多种控制任务。微控制器的设计通常需要高级编程语言的相关知识(如 C、Basic 语言)或汇编语言及数字和模拟

设备的操作经验。相关支撑知识与案例如第 7 章所示。网络链接 7.1 提供了各种微控制器的在线资源和制造商链接。

数字信号处理器(DSP)是另一种单一芯片的微型计算机装置。DSP 的功能与微控制器类似，但其更适合于高速浮点计算。DSP 常应用于通信、音频/视频及一些控制应用中，这些应用对快速周期来说数字滤波的快速计算和加权是非常重要的。网络链接 11.3 提供了各种 DSP 的在线资源和制造商链接。

11.2.5　单板计算机

当应用程序所需要的功能比微控制器多且不限制尺寸时，**单板计算机**是一个不错的选择。大多数单板计算机有足够的 RAM 并支持高级语言的编译，如 C 语言。单板计算机通常也容易与个人计算机相连接。因此可以在单板计算机的内存中进行有用的测试、调试、开发和下载软件等操作。

使用术语袖珍控制器来表述在微控制器和单板计算机之间的一类设备。它们包括：Handyboard、Basic Stamp 和 Arduino，这些芯板包含微控制器和其他便于与外部元器件接口的组件。网络链接 11.4 提供了单板计算机和袖珍控制产品在线参考资料的链接。

11.2.6　个人计算机

对于大型复杂的机电一体化系统来说，一个台式机或笔记本**个人计算机**(PC)也可以作为一个控制平台。同时，对于那些不适用于微控制器和单板计算机的应用场合来说，个人计算机是一个有吸引力的选择。通过使用商用数据采集卡或模块可以使计算机很容易地与传感器和执行器相连接(见 8.3 节)。这些设备通常包括软件驱动程序，使其可以在标准的编程高级语言编译器和开发环境下工作。由于上述方法简单便捷，个人计算机控制的机电一体化系统广泛应用于常见的研发测试和产品开发实验室中，其中最为常见的就是快速原型，但在大量生产和小型化生产中却并不常见。

11.3　控制理论简介

在机电系统设计中，经常需要快速且精确地控制一个输出量(如电动机轴的位置或速度)。视频演示 10.3 为一个典型位置控制的例子，视频中以惊人的速度和准确率对计算机硬盘的读写头进行了控制(见视频演示 10.4 中的超慢动作回放)。对准确控制来说，通常需要使用传感器反馈来完成相应的动作(如一个编码器或转速表)。通过将反馈信号与期望的输入信号(称为设置点值)相减，可以获得一个测量响应的误差值。根据系统误差信号可以不断改变命令信号，从而改善系统的响应。这就是所谓的**反馈**或**闭环控制**。本节的目的是介绍反馈控制系统设计的基础知识。

控制系统设计的理论和实践是非常复杂的，它通常可能涉及一些你不熟悉的数学运算和软件工具。然而，对于读者来说重要的是理解控制系统的设计方法，首先明确其应用价值，其次是培养一个想要更多了解控制领域知识的渴望(如通过后续课程)。在接下来的部分中，通过一个基本但重要的控制直流电动机转速的例子来探讨反馈控制的概念。

在继续之前，可能要查看视频演示 11.4 和 11.5。其中展示的这两个实验表述了各种不同的控制系统。这些例子可以帮助您更好地学习本节的相关知识。视频演示 11.3 很好地解释了 PID 控制的基本原则，而 PID 控制是许多控制系统的基础。

11.3.1　电枢可控直流电动机

利用永磁或磁场控制的直流电动机是一种在许多机电一体化系统中广泛应用的重要机电设备。在机电一体化系统的应用中，通常需要根据设计需求来精确控制输出位置、速度或电动机转矩。这是一个需要反馈控制设计得很好的例子。在每一个机电控制系统中，所需要考虑的第一个问题就是对电动机进行建模。一个物理系统的模型通常称为**平面**。然后对问题应用线性反馈的分析来帮助选择控制器的设计参数，以合理地跟踪期望的指定输出

(输入)。因此，在设计控制器之前，需要建立一个良好的电动机数学模型(系统模型)。

直流电动机的基本响应方程已在10.5节中进行了相应的介绍，但这里将进一步深入分析。直流电动机具有电枢电感 L 和电阻 R，因此当其在磁场中旋转时将生成一个输出转矩和角速度。考虑电动机结构，当电枢线圈通过定子磁场时反电动势(电压)与角速度成正比。图11-3所示为系统中重要的组成元素。在负载惯性 I_L 和阻尼 c 下，电枢轴传递转矩 T。通常电动机电枢也有惯性，将电枢和负载的总转动惯量记为 I。

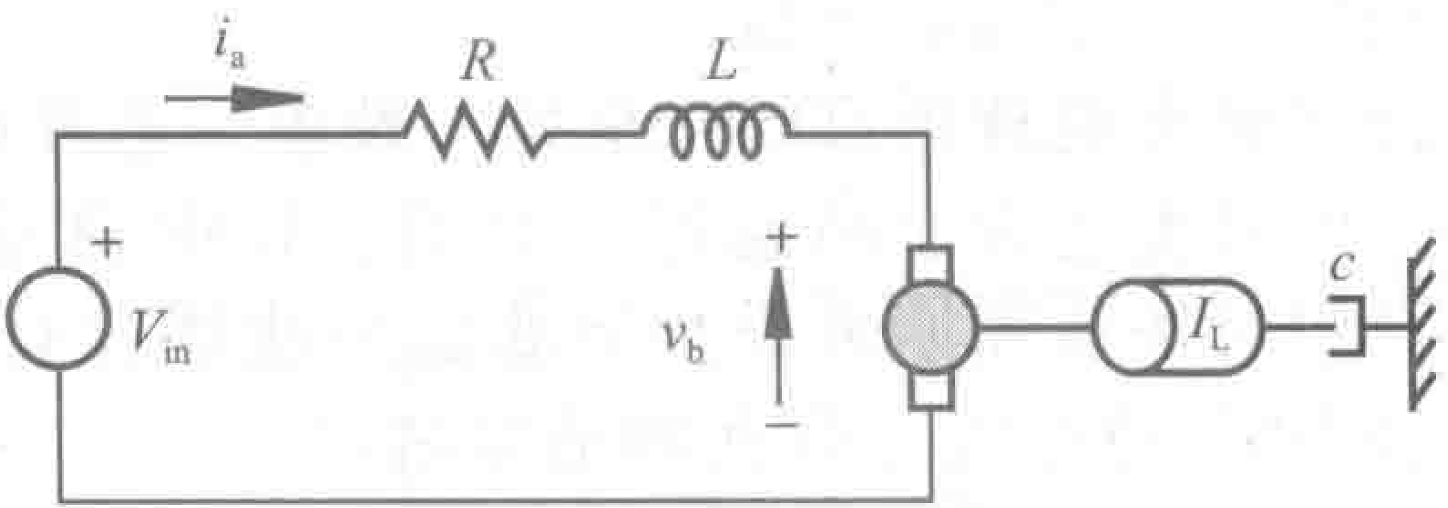


图 11-3　电枢控制直流电动机

电枢控制直流电动机的模型假定电动机产生的转矩 T 与电枢电流 i_a 成正比：

$$T(t) = k_t i_a(t) \tag{11-1}$$

同时，反电动势或电压与电动机转速成正比：

$$v_b(t) = k_e \omega(t) \tag{11-2}$$

其中，k_t 和 k_e 为电动机的设计参数，由电动机制造商提供。如果对系统的机械部分画一个自由机构图，并根据基尔霍夫电压定律对电气部分进行建模，可以写出两个耦合微分方程，它们定义了电动机电气和机械性能：

$$v(t) = i_a R + L\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} + k_e\omega \tag{11-3}$$

$$I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = T - c\omega = k_t i_a - c\omega \tag{11-4}$$

i_a 与 ω 实现耦合。

在先进的工程系统分析中，拉普拉斯变换通常用于简化数学运算并帮助解释结果。一个数学变换是将等式转换成另一种更容易处理的形式。拉普拉斯变换的显著优势是可以将一个常微分方程转化为一个代数方程。在4.10.2节步骤1的描述中，复变量 s 成为函数变量以代替时间变量。如果对两个微分方程式(11-3)和式(11-4)进行拉普拉斯变换，则它们将转化为在 s 域的代数表达式，即：

$$V(s) = (Ls + R)I_a(s) + k_e\Omega(s) \tag{11-5}$$

$$Is\Omega(s) = k_t I_a(s) - c\Omega(s) \tag{11-6}$$

大写字母用来表示对应时域函数的拉普拉斯变换[如 $\omega(t)$ 的拉普拉斯变换为 $\Omega(s)$]。

可以使用系统方程的拉普拉斯变换形式[式(11-5)和式(11-6)]来画一个**框图**以说明电动机系统中信号的流动(如图11-4所示)。方程中的术语如图所示，因此可以看到图与方程之间的关系。同时，反电动势[$k_e\Omega(s)$项]实际上发生在一个负反馈循环中，主要用于稳定电动机的速度，尽管没有在系统中明确设计该参数。

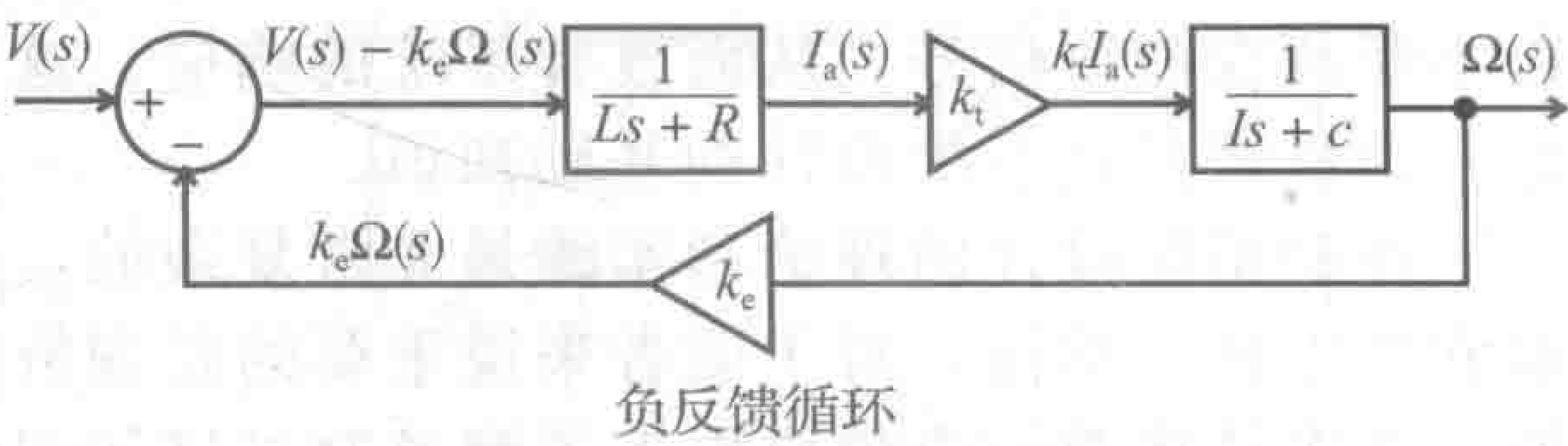


图 11-4　直流电动机系统的框图(平面)

设计控制器的一个重要步骤是给出系统输入与输出之间的关系，这称为系统的**传递函数**。通过联合式(11-5)和式(11-6)，可以获得：

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(Is + c)(Ls + R) + k_e k_t} = G(s) \tag{11-7}$$

传递函数 $G(s)$ 与电动机的输出速度 $\Omega(s)$ 及输入电压 $V(s)$ 有关。以 s 表示的分母多项式称为**特征方程**。这个多项式的阶数预测了系统的属性。这是二阶系统，所以你的二阶响应知识将有助于理解当输入的阶跃电压变化时的角速度响应。

11.3.2 开环响应

一般来说，传递函数可以告诉我们很多关于系统响应的知识。s 是一个复变量，同时传递函数具有**极点**(使得分母多项式为 0 时的 s 值)，该值对于解释直流电动机的响应具有极其重要的影响。它们对于电动机的稳定具有深远的影响，也就是说是否会有干扰或输入导致输出的无节制增长。事实上，检查复平面方程中极点的位置可以帮助评价系统是否稳定。它们还决定了当输入电压的命令变化时电动机是否会出现输出振荡。这就是软件工具 Matlab 在分析中的重要价值。可以使用 Matlab 容易找到极值及各种输入下的响应，特别是电动机的阶跃响应。特征方程的系数是由电动机参数所决定的，它们对于确定系统的响应具有重要作用。在第 4 章中介绍了零阶、一阶、二阶和高阶系统，并确定了它们响应的特点。因此，了解系统的阶数可以帮助预测响应的模式。

以计算电枢可控的直流电动机响应为例。上述过程通过在 Matlab **仿真**软件创建一个模型即可以实现，其操作顺序为设置参数、施加阶跃输入和画出输出零响应。网络链接 11.5 和 11.6 为使用和应用 Matlab 仿真软件的学习教程。图 11-5 所示的框图模型，电气和机械传递函数被分离。图 11-6 所示当输入为单位阶跃电压时，输出角速度的曲线。

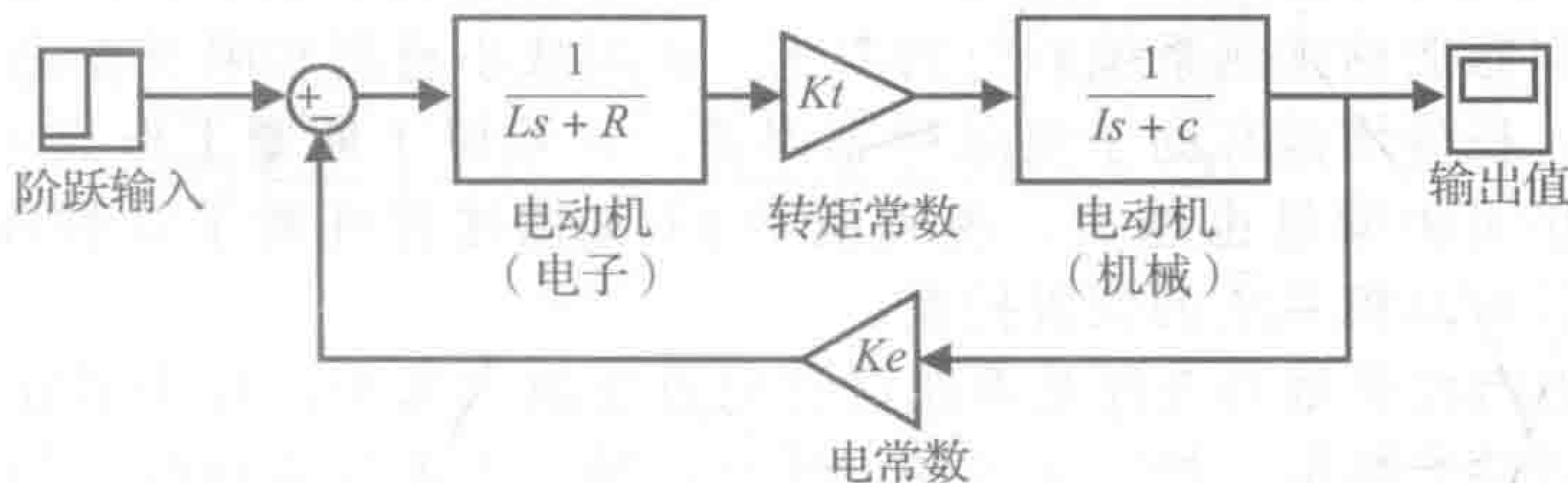


图 11-5 仿真模型的系统框图

根据二阶特征方程的特性可知，输出角速度需要一段时间才能响应阶跃输入，并渐近达到最终值。这种过阻尼响应就是所说的电动机开环反应，其主要原因在于没有在系统中添加反馈(除了现有的内部反电动势)。目标是使用一个反馈控制器来改变响应并满足设计规范，这些规范包括有：更快的上升时间、一些有限的过度、没有振荡。

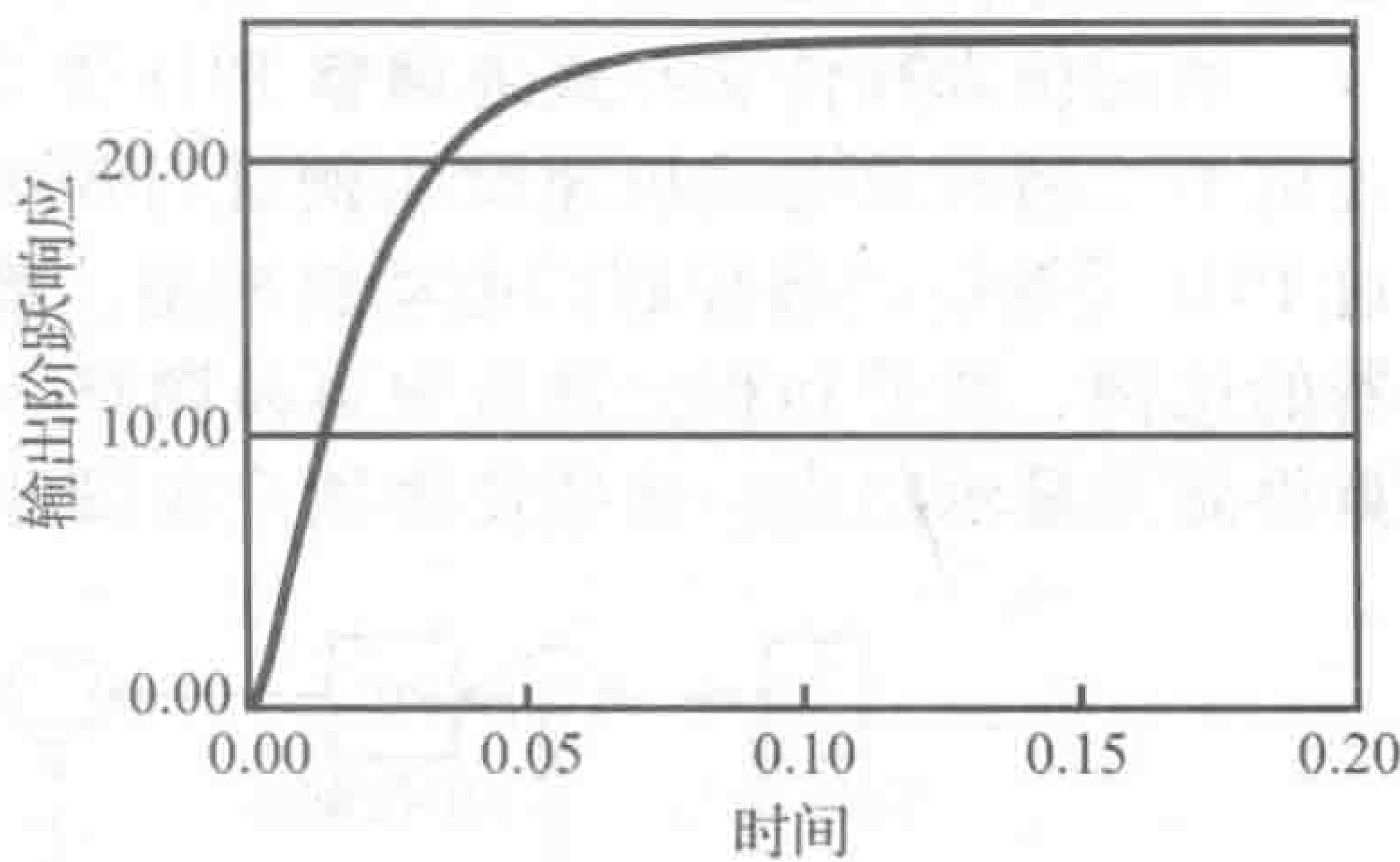


图 11-6 阶跃输入电压下的角速度输出

11.3.3 直流电动机的反馈控制

为了更有效地控制电动机，必须添加一个传感器来监测电动机的输出(在这种情况下，转速表可用来测量转速)，输出反馈到输入端与期望转速进行比较，并通过控制算法产生偏差信号来改善系统的输出响应。图 11-7 所示为反馈控制系统的框图。输入为期望的电动机转速，输出为实际的电动机转速(如转速表的检测值)，偏差信号是输入信号与输出信号的差值：

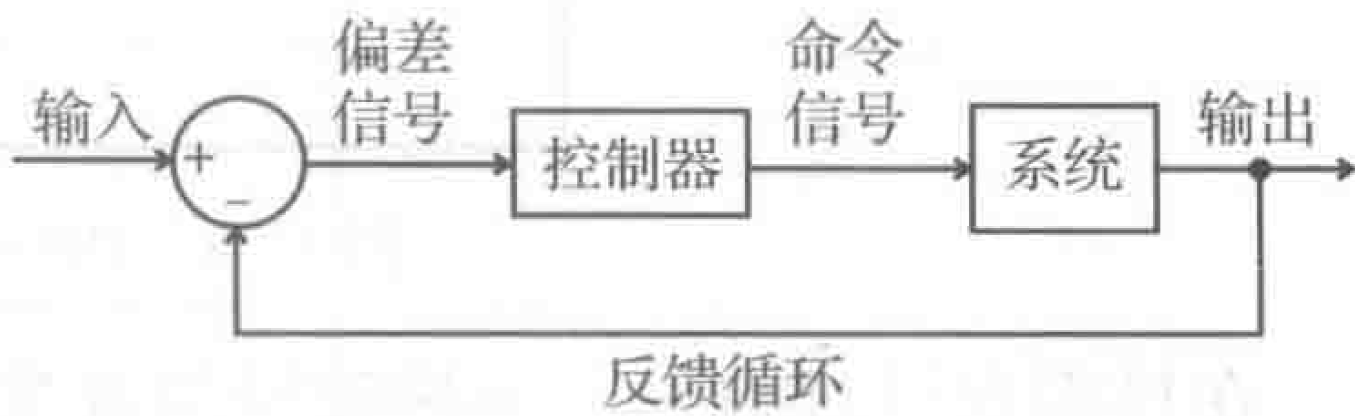


图 11-7 一般的反馈控制系统

$$\text{偏差信号} = \text{输入信号} - \text{输出信号} \tag{11-8}$$

控制器根据偏差信号来改变输入系统或装置(如电动机)的命令信号(如电动机电压)。

机电一体化系统控制器的设计涉及一些技术方法和工程学。设计控制器的一般步骤包括：

1. 选择一个控制方式。控制方式的选择过程将通过实例进行描述。一般从比例控制方式开始，即输入信号的调整与偏差信号成比例关系。然后是微积分控制方式，即输入信号的调整与偏差信号的积分和微分成比例关系，将其应用于系统以更好地获得期望的输出性能指标。

2. 通过复平面极点的位置验证闭环系统的稳定性。只要有极点位于复平面右半平面(即极点具有正实部)，则表明系统不稳定。

3. 确保稳态响应满足设计指标要求。

4. 确保瞬态响应满足设计指标要求。

5. 通过输入不同测试信号验证机电一体化系统的整体性能。

通用控制器的种类很多，但大多数工业应用使用 PID 或比例积分微分控制器。偏差信号表示为 $e(t)$时，PID 控制器的数学表达式如下：

$$\text{命令信号} = K_{\mathrm{p}}e(t) + K_{\mathrm{d}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} + K_{\mathrm{i}}\int e(t)\mathrm{d}t \tag{11-9}$$

其中，K_{p} 为比例增益；K_{d} 为微分增益；K_{i} 为积分增益。因为控制信号与偏差信号成正比，所以比例控制最直观。偏差越大，所需的纠偏量就越大。较大的比例增益可以提升系统响应速度，但同时可导致超调与振荡，尤其当系统的阻尼比较小时。微分增益对应偏差变化率，它使控制器能够预测系统响应的变化，从而减小超调和阻尼振荡。通过计算随时间变化的误差和，积分增益有助于消除稳态误差。误差位于期望工作点一侧的时间越长，由于积分增益的作用纠偏量也越大。视频演示 11.4 描述并证明了 3 种控制方式的作用，并应用于直流伺服电动机系统的位置控制。

PID 控制器中增益参数的选择是系统设计的重要组成部分，有许多分析方法和经验方法能够帮助确定增益参数值。控制系统的设计可以根据相关标准进行，如调整时间、超调量、稳态误差、上升时间等(更多信息参见第 4 章，如图 4-18 所示)。如果你想了解控制器设计的分析方法，请参考相关书籍(如参考文献中 Ogata 或 Palm)。

通过仿真软件交互式地调整 PID 增益可代替基于模型的分析设计方法，其过程可以通过电枢控制直流电动机速度实例进行说明。如图 11-8 所示，完整的仿真模型包括一个通过 PID 反馈控制器控制的电动机模型。输入为阶跃变化的速度。在仿真软件中，PID 控制器的比例、微分和积分增益很容易调整，且系统由此产生的输出阶跃响应几乎可以同时计算得到并显示出来。这些使得用户在设计过程中能够快速测试各种增益组合。

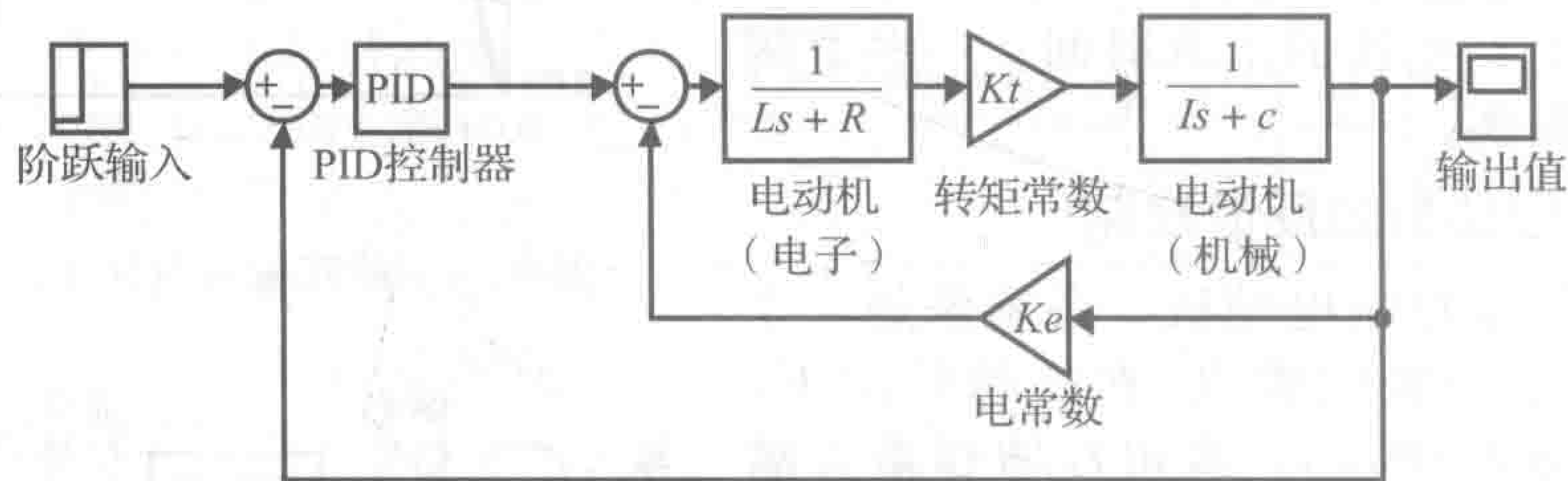


图 11-8　PID 控制电动机的仿真模型

在模拟设计过程中，一种较好的改变 PID 增益的方法是逐渐增加比例增益(K_{p})直到上升时间足够快且没有太多的超调和振荡为止。图 11-9 所示为在不同比例增益值下的响应。当系统增益较低时，系统响应缓慢且存在明显的稳态误差(即响应终值未很接近期望的最终速度)。当系统增益较大时，系统响应较快，但存在明显的超调和振荡。

当调整完比例增益后，微分增益的加入可限制超调和振荡。当系统采用较大微分增益以降低整个系统的增益时，有时必须减小比例增益。图 11-10 所示为不同微分增益值所对应的阶跃响应。当增益较低时，超调和振荡是仍然存在的。当微分增益较高时，超调或振荡将得到消除，但反应非常迟缓。

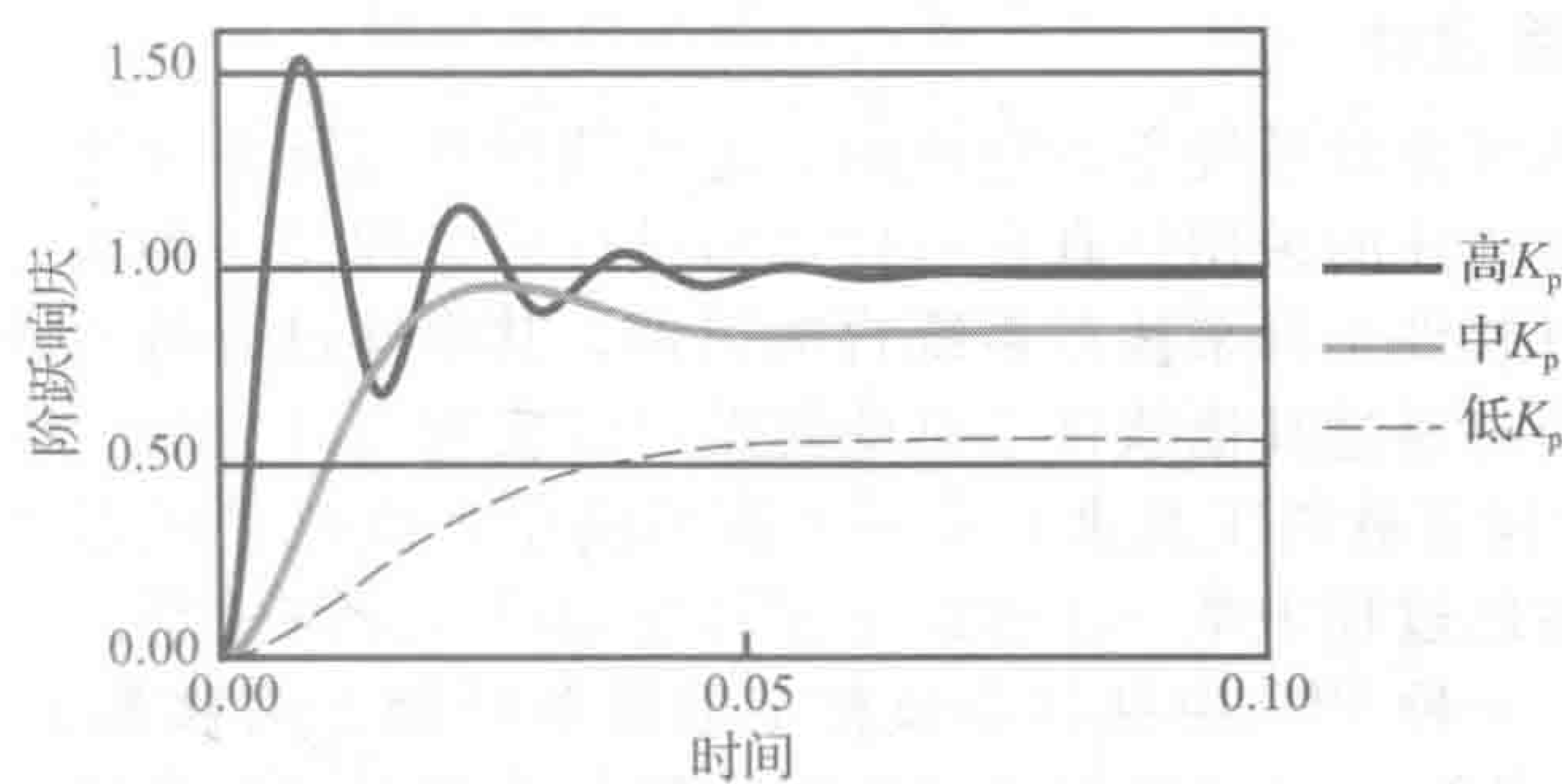


图 11-9 不同比例增益的影响

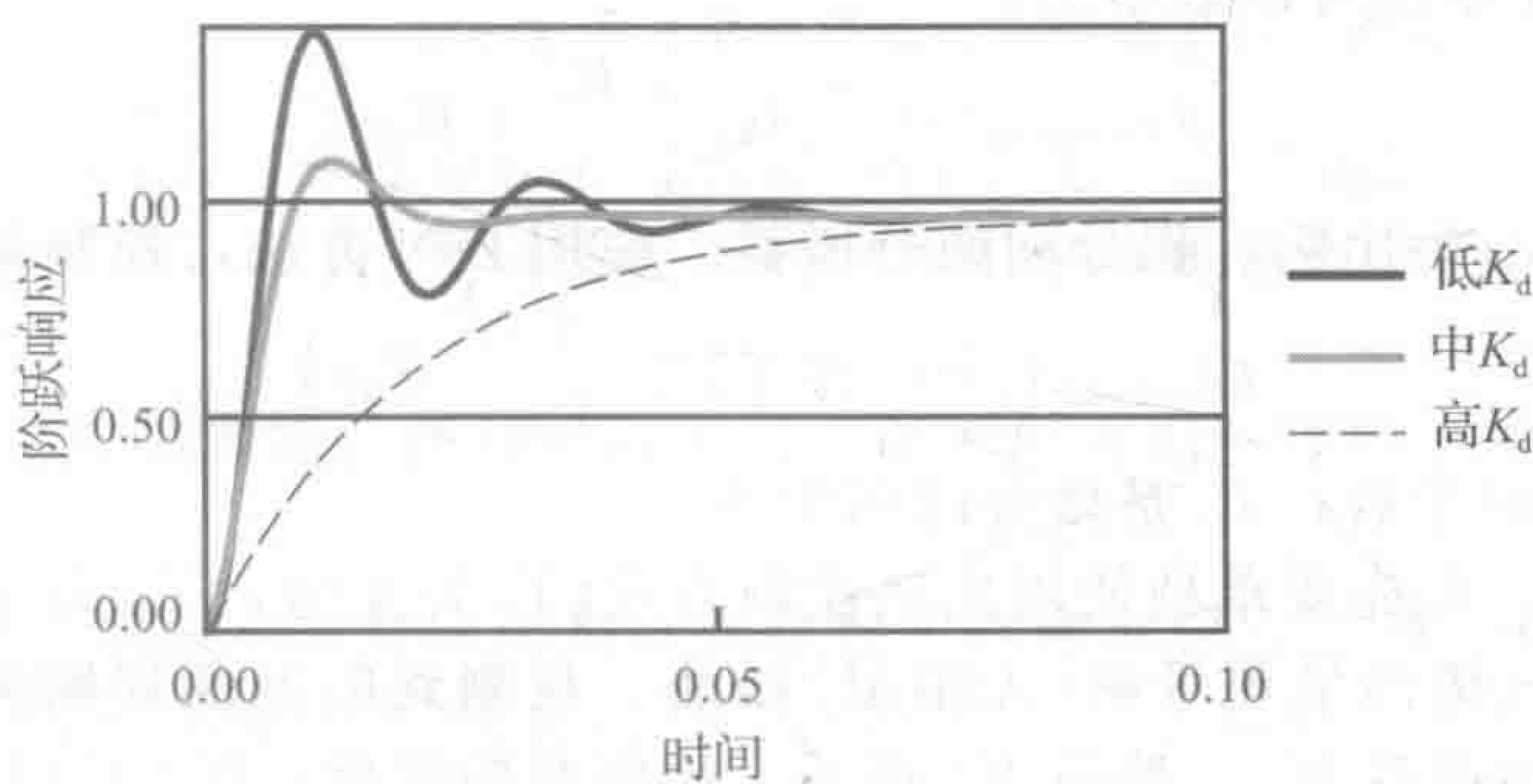


图 11-10 不同微分增益的影响

对于大多数系统来说，单一地调整比例增益和微分增益，在阶跃响应中系统输出会出现稳态误差(即系统输出不能完全达到期望值)。对于电动机转速控制的示例而言(见图 11-10)，其原因是显而易见的。为了在稳态下维持恒定转速，作用于电动机的命令信号必须非零(参见图 11-7)。因为命令信号是关于偏差信号的函数，在合适的比例增益控制下(注意，稳态时导数项为零)控制器存在一非零偏差信号，它输出命令信号至电动机，使得电动机转动。积分增益可使得控制器能够克服这些局限，并使偏差为零。积分项会使一段时间内的偏差累加，并且偏差信号持续时间越长命令信号中增加的修正量越大。图 11-11 所示为不同积分增益值所对应的阶跃响应。当积分增益较大时，偏差将会很快消除，但超调量大于无积分增益时的情况。当积分增益较低时，偏差消除缓慢，但最终将趋近于零。中等积分增益下的响应曲线展示出良好的阶跃响应效果。在这种情况下，超调量很小，几乎没有振荡，响应输出调整时间很短，并且无稳态误差。

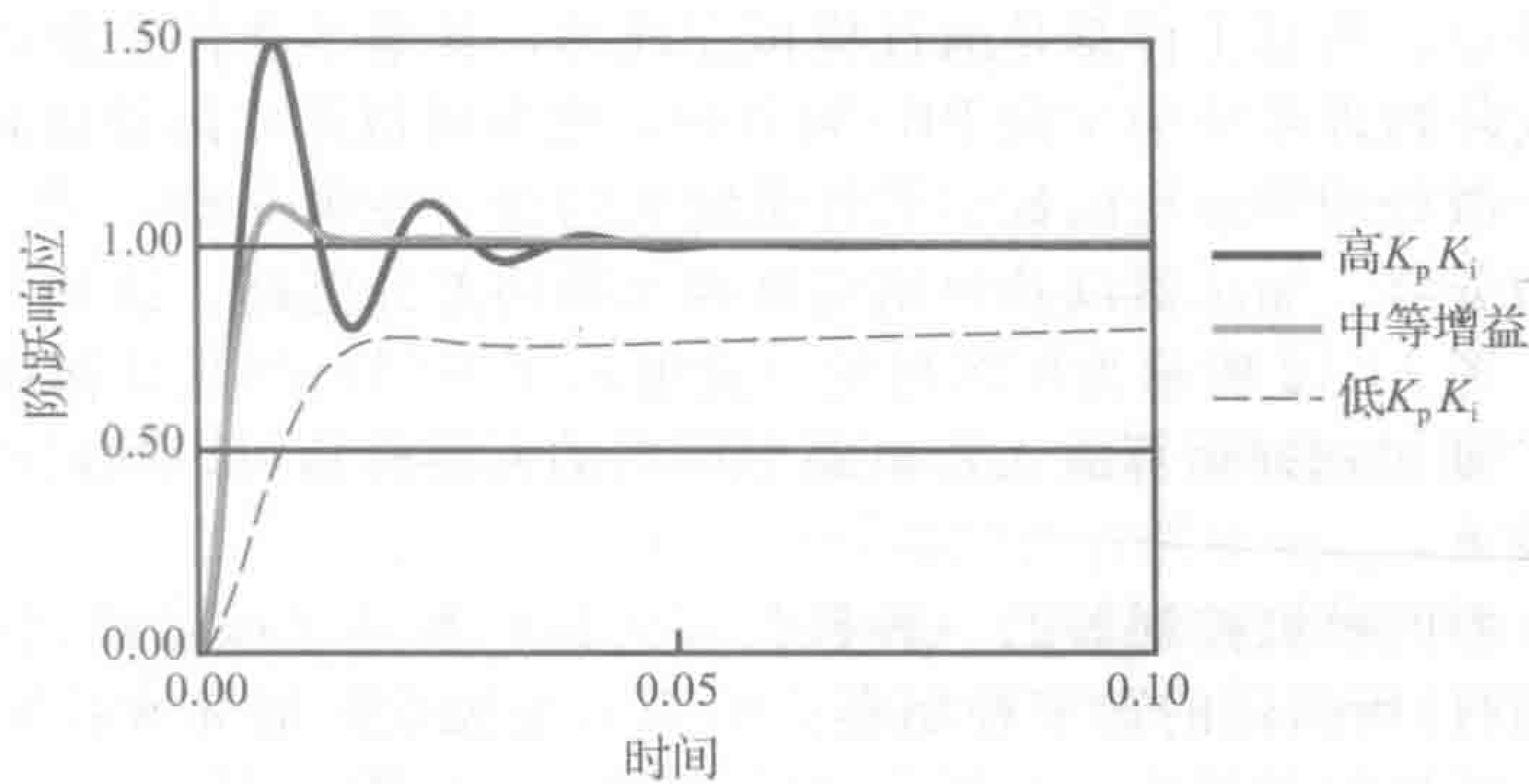


图 11-11 不同积分增益的影响

11.3.4 控制器经验设计

当很难或根本不可能对系统分析建模时，可以通过对实际系统进行性能测试来经验设计控制器。前一节所描述的采用仿真进行控制器设计的过程是一种可以迭代调整增益的方法。同时还可以通过软件工具来执行系统自动识别，其中通过分析系统对各种输入的响应来近似一个模型。同时通过其他软件工具的帮助可以实现设计完成一个控制器。视频演示 8.8 展示了如何通过设置软件工具来开发一个控制简单直流电动机系统的速度控制器。视频演示 8.9 提供了在此过程中单一步骤的更多背景知识和详细信息。

在工业应用中，一种 PID 控制器参数整定的简单经验方法称为 Ziegler-Nichols(Z-N)方法(见参考文献)。Z-N 方法主要是通过观察控制条件下系统的阶跃响应来实现的。通过观测，可以选择 PID 增益使系统获得具有最小超调和振荡的快速响应。

在 s 域，PID 控制器可以表示为：

$$G_{\text{controller}}(s)=K_{p}+\frac{K_{i}}{s}+K_{d}s \tag{11-10}$$

其中，K_p、K_i 与 K_d 为比例、积分和微分增益。使用 Z-N 方法，控制器可以表示为：

$$G_{\text{controller}}(s)=K_{p}\left(1+\frac{1}{T_{i}s}+T_{d}s\right) \tag{11-11}$$

其中，T_i 为积分时间常数；T_d 是微分时间常数。

使用 Z-N 方法，首先要单独使用比例控制方式(T_i 为无穷，T_d 为 0)，K_p 从零开始递增直至观测到的系统输出呈现等幅(无阻尼)振荡。观测到的振荡周期标记为 P_{cr}，其所对应的增益值称为临界增益 K_{cr}。然后 K_p 按某个比例开始降低，$K_i(T_i)$和 $K_d(T_d)$可以根据表 11-1 所示的比例进行选择。Ziegler 和 Nichols 证明对于所选控制方式，表中各比例可以得到较好的系统响应。注意 PI 控制方式下 K_p 值比 PID 控制方式下的对应值要低，其原因在于积分分量增加了系统阶数并降低了系统稳定性，微分分量有利于增强系统稳定性，所以 K_p 可以稍微增加一点。

表 11-1 Z-N 方法推荐的增益值

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	无穷	0
PI	$0.45K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$0.125P_{cr}$

通常 Z-N 增益方法只能作为一种初始设计方法，你需要调整增益(即调整 K_p、K_i 和 K_d 参数值)来实现想要的特殊设计。这通常需要经历一些试验和错误。

11.3.5 控制器的实现

在之前的章节中，所有工作都是通过模拟完成的，其基本条件是物理系统可以用数学模型来描述。在实际物理系统中实现 PID 调节时，模型可以用实际硬件替代，控制器必须用模拟电路或基于微处理器运行的数字软件系统来构建。在第 5 章，学习了如何构建比例增益、积分器、微分器、加法器以及使用运算放大器的差分电路。这些电路可以构建模块化的模拟控制器。图 11-12 所示为用图形的方式展示了不同电路是如何组合以创造一个模拟 PID 控制器的。通过选择运算放大器电路中适当的元器件值可以确定每种控制方式对应的增益(K_p、K_i 或 K_d)。

基于运算放大器的模拟控制器的一种替代方式是一种基于微处理器(例如，一个微控制器)的利用系统软件所创建的数字控制器。因为需要独立时间完成控制更新，所以数字控制系统是不同于模拟控制器的。在每个更新周期内，传感器检测信号，控制器计算结果并将其输出。控制周期在时间上的延迟会影响系统的响应。在系统数学模型中必须考虑其

影响以使其能够准确预测系统响应和灵活选择控制参数。根据 z 变换的概念，连续的 s 域可转换为离散分量，从而能够对系统进行建模和分析。如想要继续深入研究，请参考关于现代控制理论方面的书籍。

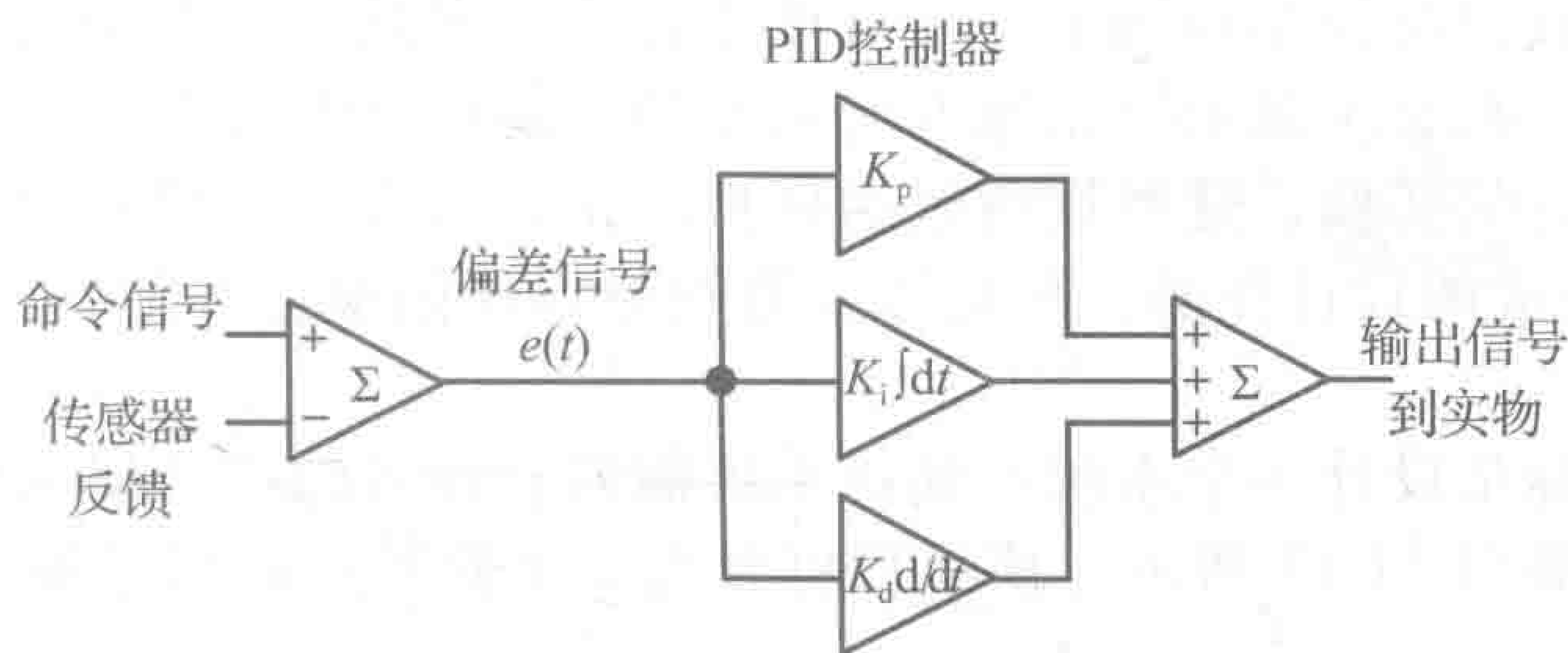


图 11-12　由运算放大器电路组成的模拟 PID 控制器

为了实现数字控制器，微分和积分过程必须离散化。若对偏差信号进行连续样本并表示为 e_1，e_2，e_3，…，e_i，e_{i+1}。可以通过下列方程来求解积累积分的近似结果。

$$I_i = I_{i-1} + \Delta t e_i \tag{11-12}$$

其中，$I_0=0$；Δt 为控制周期。微分可以通过有限差分近似法得到。例如，

$$D_i = (e_i - e_{i-1})/\Delta t \tag{11-13}$$

然而，数字滤波器通常需要应用到计算过程中以降低位置信号中高频噪声产生的不良影响(见课堂讨论项目 11.1)。控制循环的代码如下：

```
error_previous = 0
integral = 0

loop:
    Gosub get_set_point_value     ' acquire set_point value
    Gosub acquire_sensor_         ' acquire sensor_value

     error = sensor - set_point
     integral = integral + error*DT
     derivative = (error - error_previous)/DT

     output = KP*error + KI*integral + KD*derivative
     Gosub send_output_to_system ' update command signal

     error_previous = error
Goto loop
```

课堂讨论项目 11.1　微分滤波

如式(11-13)中所提到的内容，微分计算通常需要进行滤波处理。一种实现方法是对前面的一组微分数据进行平均处理(即采用连续平均)。这种方法的效果是什么？如何修改示例代码可以实现呢？

11.3.6　结论

本节对控制理论给出了非常简洁的概述。尽管该主题不能通过上述论述充分覆盖，但至少对主要概念有基本的了解。对于该领域感兴趣的读者需要进行大量的深入研究。

有很多软件工具可以建模、分析和设计控制器。前面我们使用 Matlab 和 Simulink 进行仿真和设计。第 8 章中介绍的 LabVIEW 软件也可以完成这些任务。视频演示 8.8 和 8.9 介绍了基于 LabVIEW 的控制器设计的整个过程。其他的控制系统视频演示可以在网络链接 11.7 中找到。请回顾这些视频来帮助你改善对控制理论应用的理解水平。

11.4　案例研究 1——肌电控制机械手臂

这个案例研究是设计实例 5.1 的扩展，该实例主要讨论了肌电控制的假肢。这里给出了更多的细节，并且相反控制应用于一个机械手臂上。根据 7.9 节中的基于微处理控制器统的设计过程，问题被逐步提出。该案例研究是如何使用 PIC 微控制器与各种设备进行接口与通信的一个很好的实例，这些设备包括模拟电路、台式计算机和标准串口等。视频演示 11.6 展示了所完成的设计作品。你可以先看视频以便能够更好地学习下面的内容。

1. 问题定义

这个项目的目标是设计一个系统，使该系统能够利用人的二头肌的肌电电压作为机械手臂的控制信号。如图 11-13 所示，该项目可分为 3 个阶段：数据采集、分类和执行。

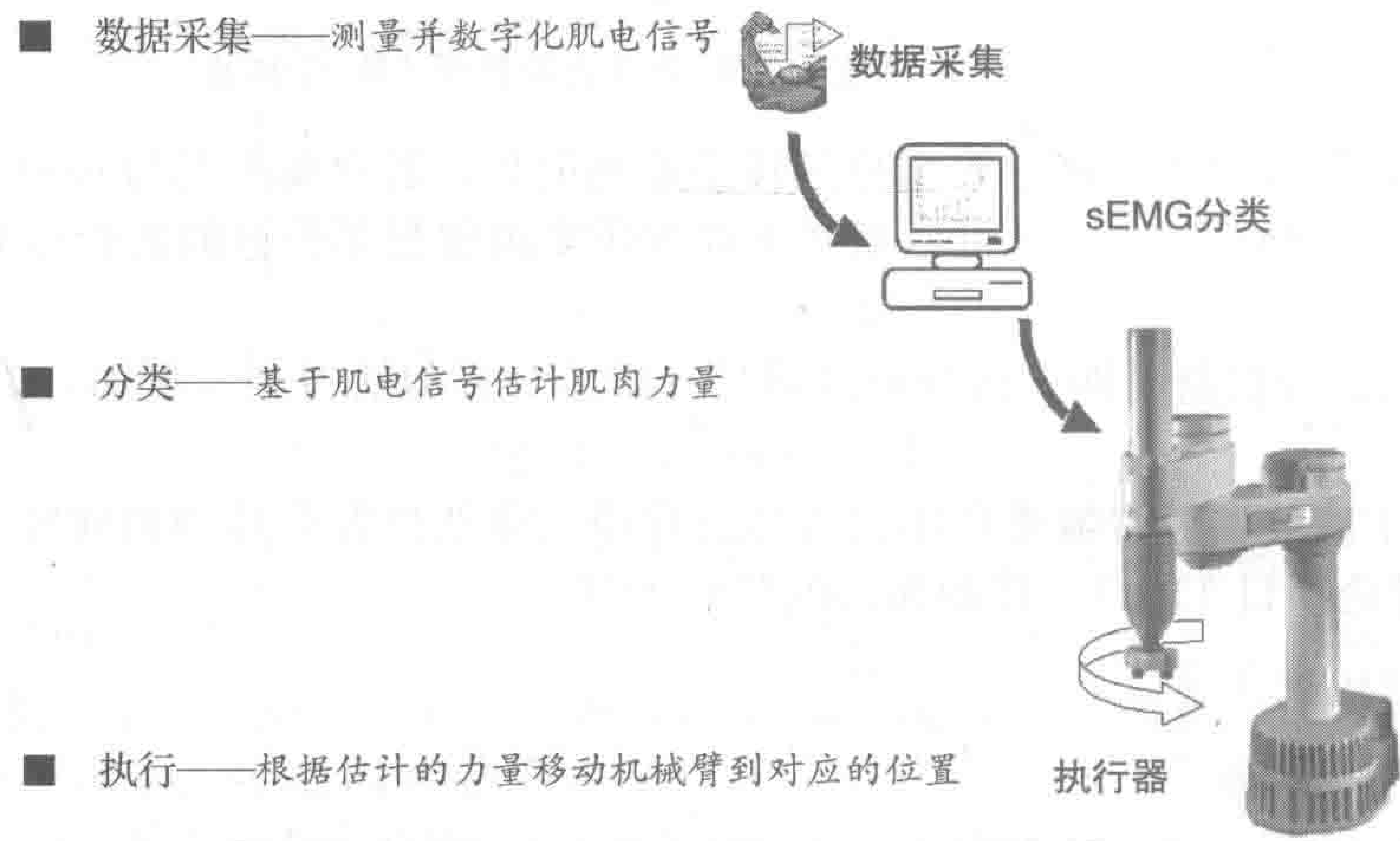


图 11-13　项目步骤

在肌肉收缩期间当离子在肌肉细胞内外流动时，便产生了**肌电信号**或表面肌动电流图(sEMG)。当神经发送信号使肌肉收缩时，一个离子的动作电位会沿着肌肉的长度方向流动。通过皮肤表面收缩肌肉上方放置的银-氯化银电极的作用，这种离子电流会被传导。同时，肌肉的收缩程度越大，所能测量到的 sEMG 信号的振幅就越高。然而，即使收缩水平保持不变，sEMG 信号也可能是没有规律的。

研究表明，一个典型的 sEMG 信号具有以下特点：

振幅	0～5mV
频率范围	0～500Hz
主导频率范围	50～150Hz

可以看到 sEMG 信号小至毫伏。事实上，皮肤表面电噪声的幅值可能大于感兴趣的信号。对于存在的噪声可能有 3 个主要的频率分量：

a. 0～10Hz：低频运动伪影(如导线摆动)

b. 60Hz：线路噪声(如在房间里的电气设备)

c. >500Hz：高频噪声(如电极与肌肉间的随机运动)

2. 绘制功能图

图 11-14 所示为一个描述系统所需组件之间信息流动的框图。在数字化肌电信号之前，它必须放大以充分利用 A-D 转换器的输入范围(更多细节见第 8 章)。然而，不能简单地把信号传递给一个运算放大器。如果这么做，噪声也会放大，也就不可能从噪声中区分出肌电信号了。因此，需要过滤掉噪声并在 A-D 转换之前对信号进行放大。该阶段的数

据处理称为**信号调制**。

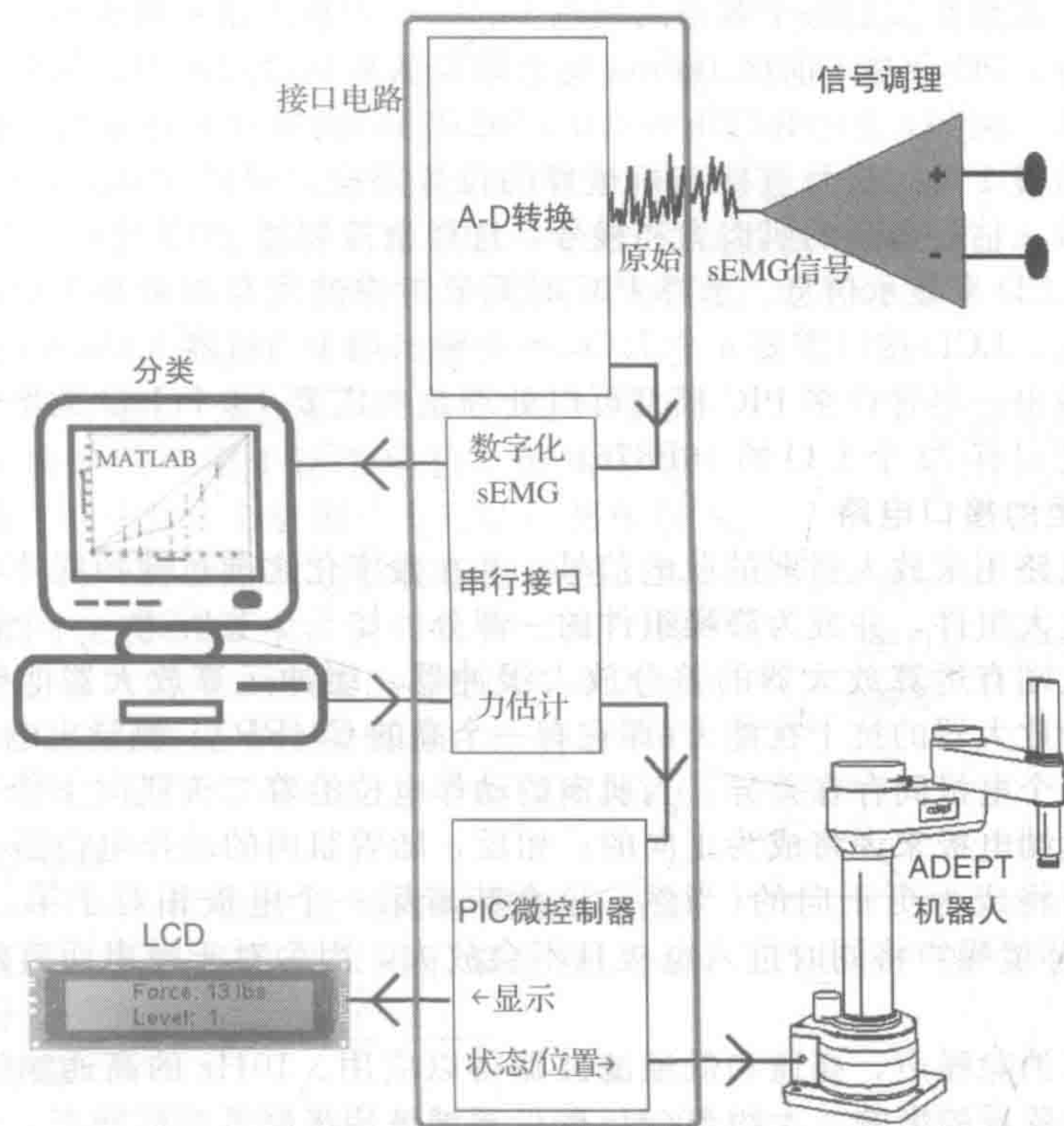


图 11-14　系统总体结构图

在信号放大且噪声去除后，可以准备进行 A-D 转换了。数字化后的信号发送到计算机，其中肌肉力量的估计是基于对肌电信号的分析来完成的。估计出的力是通过机械臂的接口电路进行传输的。然后手臂移动到与估计出的力对应的位置。例如，休息时，机械手臂在 0°；并且在最大收缩水平时，机械手臂将张开至最大角度；中间收缩水平时，机械手臂将位于两者间对应的位置。虽然可以通过直流或步进电动机来构建机械臂，但本项目采用 AdeptOne-MV 机械臂。这种类型的机器人通常用于工业生产中(如组装线作业)，同时它也是一个较好的实验室假肢模型。

3. 确定 I/O 要求和选择合适的微控制器型号

虽然一个微控制器可用于一些有创意的项目中，但使用两个微控制器却可以简化问题。一个微控制器可以执行 A-D 转换，并将数字信号发送到计算机。另一个微控制器则作为计算机与机械臂间的接口。对于执行 A-D 转换的微控制器来说，主要限制是它必须含有一个采样率超过 1000Hz 的模拟输入(因为采样定理指出，采样频率应该至少是信号最高频率的两倍，滤波后信号的最高频率为 500Hz)。这里选择了 PIC16F819 芯片，尽管任何 PIC 的 A-D 转换能力都可以达到这一要求。带模拟输入的 PIC 间唯一的显著区别是其分辨率不同，有些是 8 位、12 位，但是大多数都是 10 位(如 16F819)。采用 20MHz 晶振时，PIC 可以在大约 50kHz 时采 10 个位值。很明显，这远远高于所需的 1kHz。然而，这一过程的瓶颈不是采样率，而是将数字信号传输到计算机所需的时间。因为 PicBasic 函数库为串行通信提供了方便的接口函数，因此选择串口协议作为通信协议。PIC 的最快标准串口波特率是 38 400bit/s。因为每个字节数据限制为 8 位，因此每个 10 位值分成 2 个字节(加上每个字节的起始位和停止位)。因此，每个 10 位值需要 20 位数据来发送(2 个起始位+2 个停止位+2 个字节)。结果，PIC 只能以 1920Hz 的频率发送数字化值(38 400bit/s/20bit)。系统会源源不断地发送数据，因此也很容易导致数据在接收端出现损坏。如果

发送器和接收器的时钟不同步，接收端(即 PC)可能无法判别出数据的起始与停止。为了避免这个问题，需要在发送每个数值之前在 PicBasic 中插入很短的延迟。

每隔 100ms，PC 会基于前面 100ms 发送的数据来估计肌肉力。同时，估计得到的肌肉力将存储起来。例如，0～5lb(1lb＝0.453 592 37kg)的估计力将分配给栈 0，5～10lb 的估计力将分配给栈 1 等。栈号直接与机械臂的位置对应。每隔 100ms，PC 将会发出两个字节到串行端口：估计得到的肌肉力和栈号。选择微控制器 PIC16F876 来与 PC 及机械臂连接，并通过 LCD 来显示信息。选择 PIC 时需要考虑的主要因素是 I/O 的数量。串行通信需要 1 个输入，LCD 接口需要 6 个 I/O，5 个输出用于与机器人 Adept 接口，LED 状态显示需要 1 个输出。尽管许多 PIC 模型可以处理这些需要 13 个 I/O 的案例，但为了应对未来的升级会使用有 22 个 I/O 的 16F876。

4. 确定必要的接口电路

信号调理电路用来放大微弱的肌电信号，并在数字化之前过滤掉噪声。一个测量放大器用作主要的放大组件，并成为降噪组件的一部分。如 5.9 节所述，一个测量放大器实际上是在两个输入端有运算放大器的差分放大缓冲器。缓冲运算放大器能够提供高输入阻抗，并提高差分放大器的抗干扰能力(即它有一个高的 CMRR)。测量出电压差的原因在于放在二头肌的两个电极间存在差异。当肌肉的动作电位沿着二头肌向下传导时，第一个电极相对于其他远端电极来说将成为正向的；相反，随着肌肉的动作电位沿着二头肌持续动作，第二个电极将成为更正向的(当然，这意味着第一个电极相对于第二个来说将会为负)。理论上，环境噪声将同时进入电极且不会放大，因为对于噪声而言两个电极之间的压差为零。

为了进一步消除噪声，高通和低通滤波器得以应用。10Hz 的高通滤波器用来降低运动伪差和直流偏移量的影响。大约 500Hz 的低通滤波用来降低高频噪声。低通滤波器应放于 A-D 转换之前是重要的，主要用于防止混叠。然而 60Hz 的线路噪声位于肌电信号频率范围的中间，所以使用陷波滤波器来去除这个频率不是一个好主意。常常寄希望于使用测量放大器来消除线路噪声。

A-D 转换器的输入电压范围为 0～5V。为了确保肌电信号的振幅在这个范围内，在信号调制电路中采用了另外两个组件：一个全波整流器和一个可调增益。全波整流器与信号的绝对值近似。因为肌电信号是双相的(即它可以是正向的，也可以是反向的)，所以使它通过全波整流器可以保证信号完全是正向的。最后，一个可调增益可以表示电极大小、几何形状和位置及不同个体间差异的影响，上述因素都会影响信号的振幅。通过调节信号调制电路的增益，可以达到大约 5V 的最大振幅(即在最大收缩水平)。

大多数**串行通信**方式所执行的协议是 RS-232。对于这个协议来说，逻辑 1 的电压在 －3～－25V 之间，而逻辑 0 的电压在＋3～＋25V 之间。因为 PIC 不能输出负电压(因为一些计算机串口无法读取小于 5V 的电压)，因此需要使用 RS-232 电平转换芯片，如马克西姆公司的 MAX232 等(见图 11-15)。这些芯片将 CMOS/TTL 信号转换成 RS-232 信号，

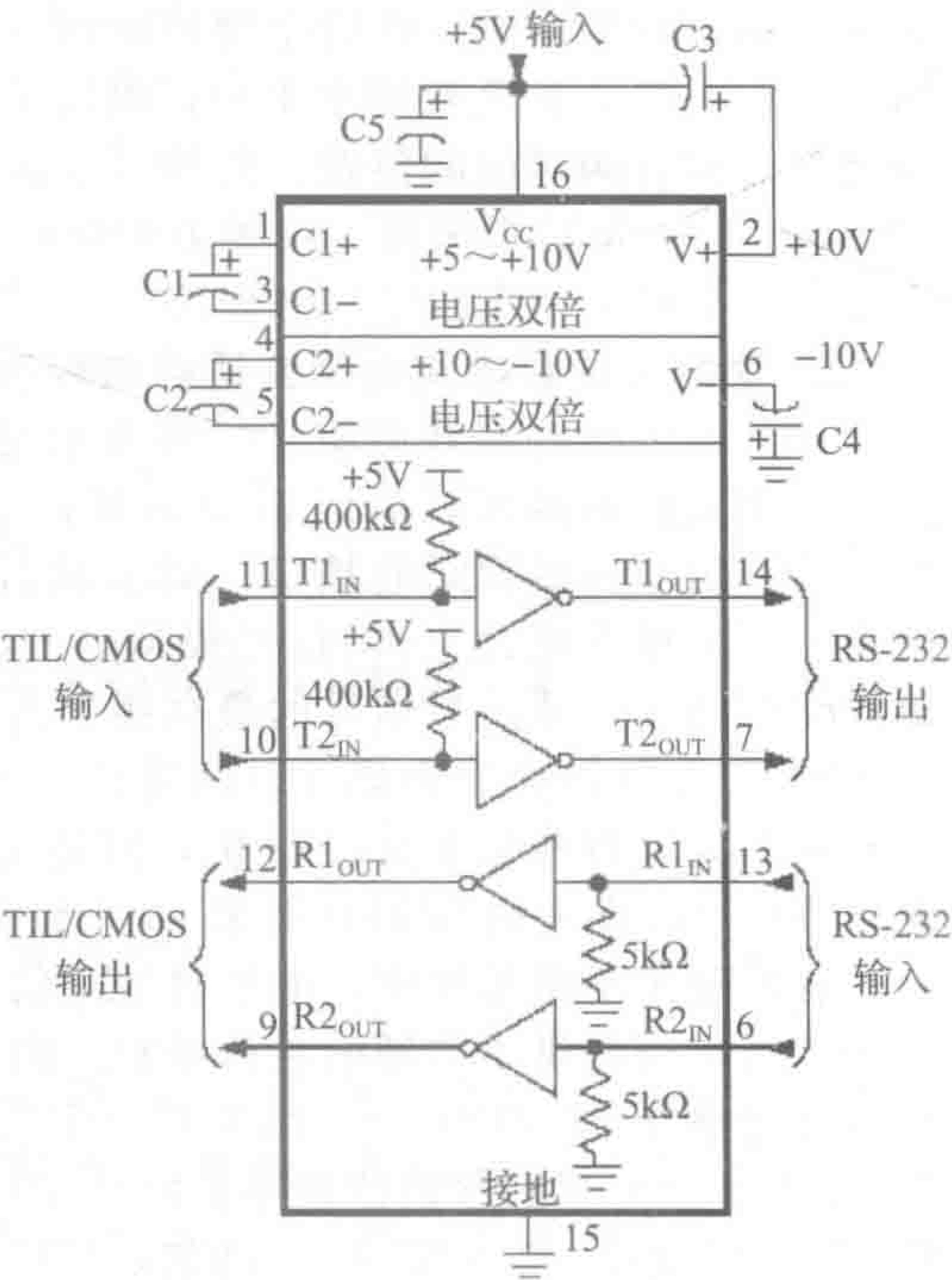


图 11-15　MAX232 电平转换器

反之亦然。同样重要的是它们会改变信号。例如，当给定一个 5V 输入时，它将输出 −8V，当给定 0V 时，它将输出 8V。这些芯片能够在 5V 电源情况下提供这些输出。上述情况主要通过使用一种名为**电荷泵**的技术使之成为可能，即利用电容来存储和提高电压。

在 PicBasic 中，Serout 命令的一个参数是工作模式。该参数和波特率共同指定串行数据是 true 还是 inverted 的。因为使用的是 RS-232 电平转换芯片，所以芯片会自动反转信号为“true”信号。MAX232 芯片可将 PIC 中 A-D 转换器输出的 TTL 电平转换为 RS-232 电平信号，也能将计算机输出的 RS-232 信号转换为 TTL 电平信号。

由于 USB 和其他接口已经使串口遭到淘汰，所以 PC 上的 DB9 串行端口(参见图 11-16)已经不再多见。然而，DB9 端口仍可用于这个项目。虽然 DB9 端口有 9 个引脚，但只有 3 个引脚是有用的；其他引脚主要用于**握手**，即一种帮助控制数据流的方法。本项目所需的引脚列在表 11-2 中。引脚 2 主要用于计算机接收数字化的肌电信号，引脚 3 主要用于个人计算机将估计得到肌肉力和栈号发送到与之连接的 PIC 上(这两种情况都可以通过 MAX232 芯片加以实现)。

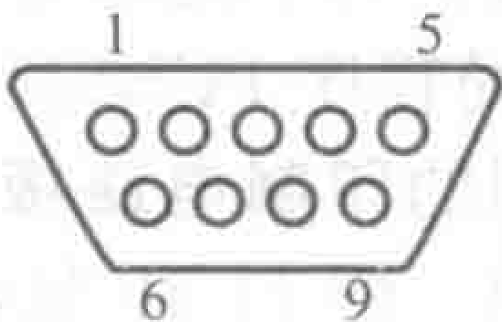


图 11-16 串行端口

表 11-2 串行端口引脚号

引脚号	描述
2	接收数据
3	传递数据
5	接地

5. 确定编程语言

选用 PicBasic Pro。运行速度和内存限制不是需要考虑的主要问题，所以不需要采用汇编语言。同时，PicBasic Pro 提供的串行通信与 LCD 接口命令十分有用。

6. 画出原理图

图 11-17 所示为信号调理电路的电路图。第一阶段是一个如图所示的电阻值构成的增益为 939 的测量放大器。然后是一个简单 RC 滤波器和紧接着的缓冲运算放大器。如果不包括缓冲运算放大器，那么后续电路的电阻值将**加载**到滤波器(阻抗)上，并改变其行为。换句话说，它不再是一个简单的 RC 滤波器。接下来是一个**两级** Sallen-Key 低通滤波器，它是有源滤波器(即它可以利用运算放大器的反馈信息)。整个过程可以用于模拟滤波器的

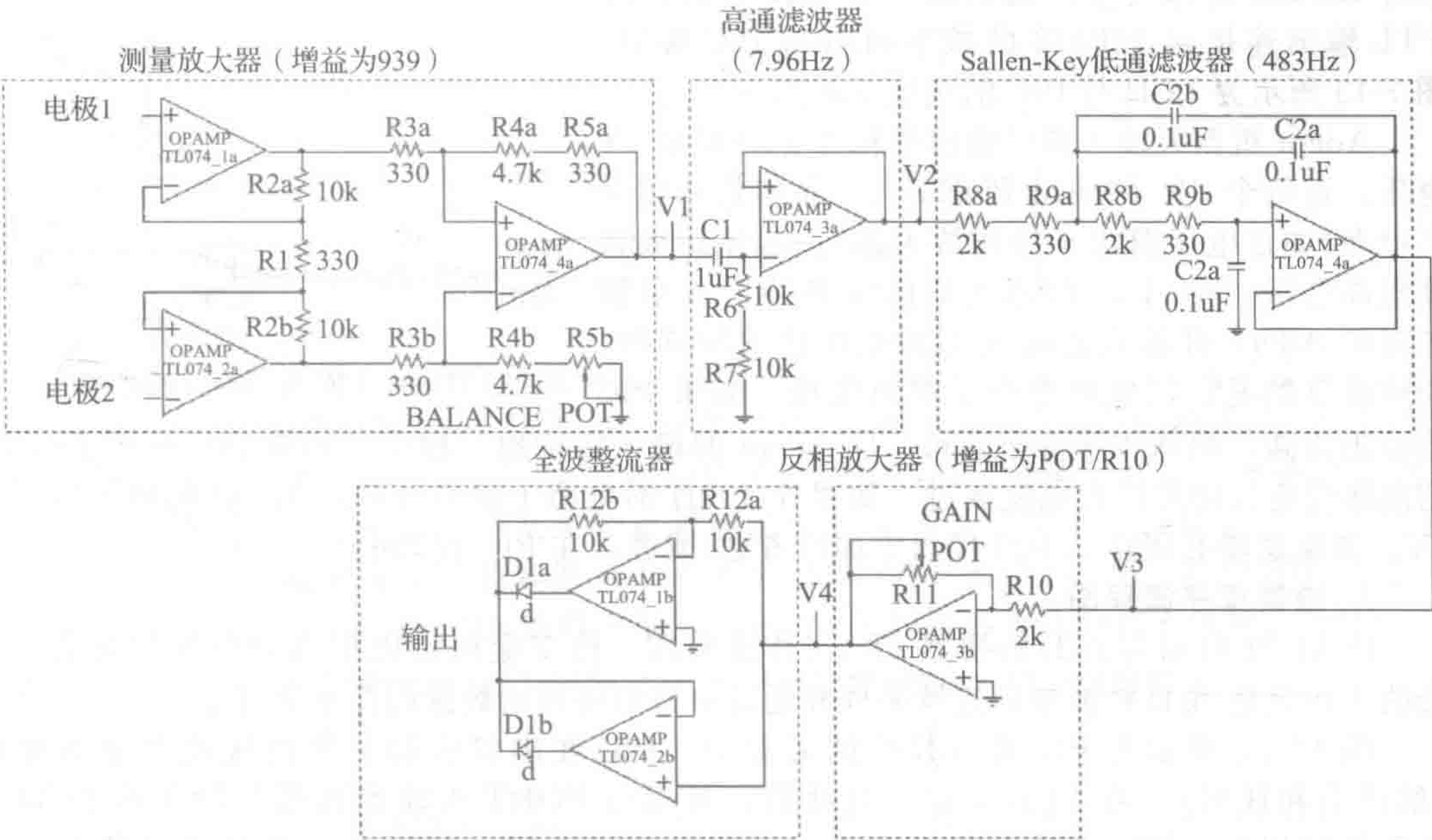


图 11-17 信号调理电路示意图

设计，但主动式滤波器比被动滤波器更稳定可靠(如一个 RC 滤波器)，附加的极点(RC 滤波器是一个单极滤波器)更有利于衰减不期望出现的频率分量。下一阶段是一个反相运算放大器，它的反馈电阻为用于调整整个系统增益的电位器。最后一个阶段是一个精密的全波整流器，它无须正向偏置电路就可以导通二极管。

肌电信号通过这个电路处理之后，将放大约 1000 倍，而这个倍数的大小主要取决于反相放大器中电位器的设置、带通为 8～483Hz 的带通滤波及全波整流器。为了使电路更稳定，通常使用在线免费 PCB 布局程序 PCB123(见网络链接 11.8)，设计原型在定制的**印制电路板(PCB)**完成制作，而不是在面包板上。图 11-18 显示了通过软件创建的 PCB 板。图 11-19 显示了组件焊接后的组装 PCB 板。网络链接 11.9 指向的文档说明了创建一个 PCB 所有必要的步骤。关于 PCB 板和焊接的有关信息，请参见 2.10.3 节。

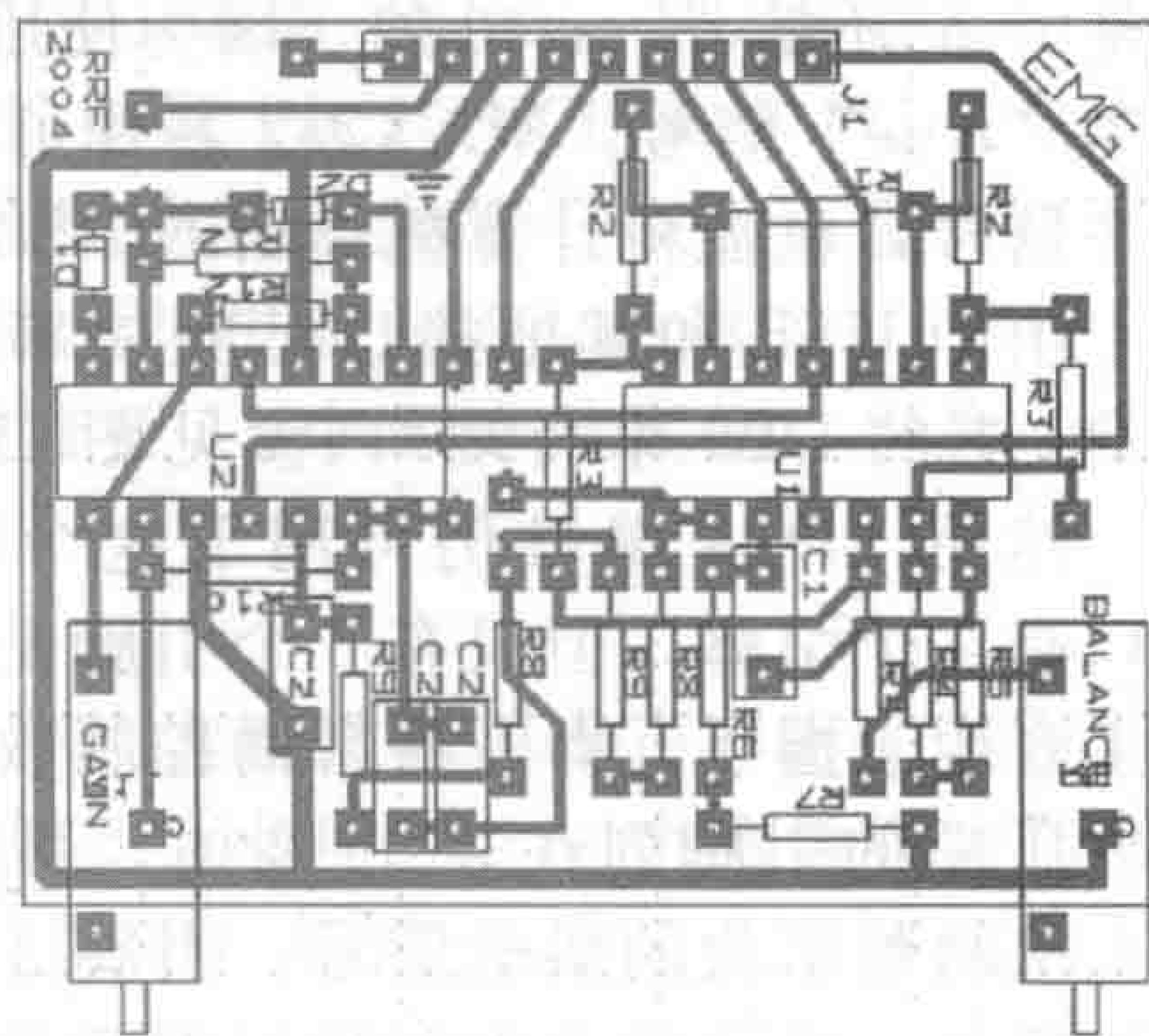


图 11-18　调理电路的 PCB 布局

示例中使用的唯一芯片是两片四边形封装结型场效应晶体管运算放大器 TL074。这些运算放大器可以在相当宽的范围内工作，大约±5～±18V。同时，两个 9V 电池使系统具有了更好的便携性。此外，稳压器可以产生 PIC 运行所需要的 5V 电压。

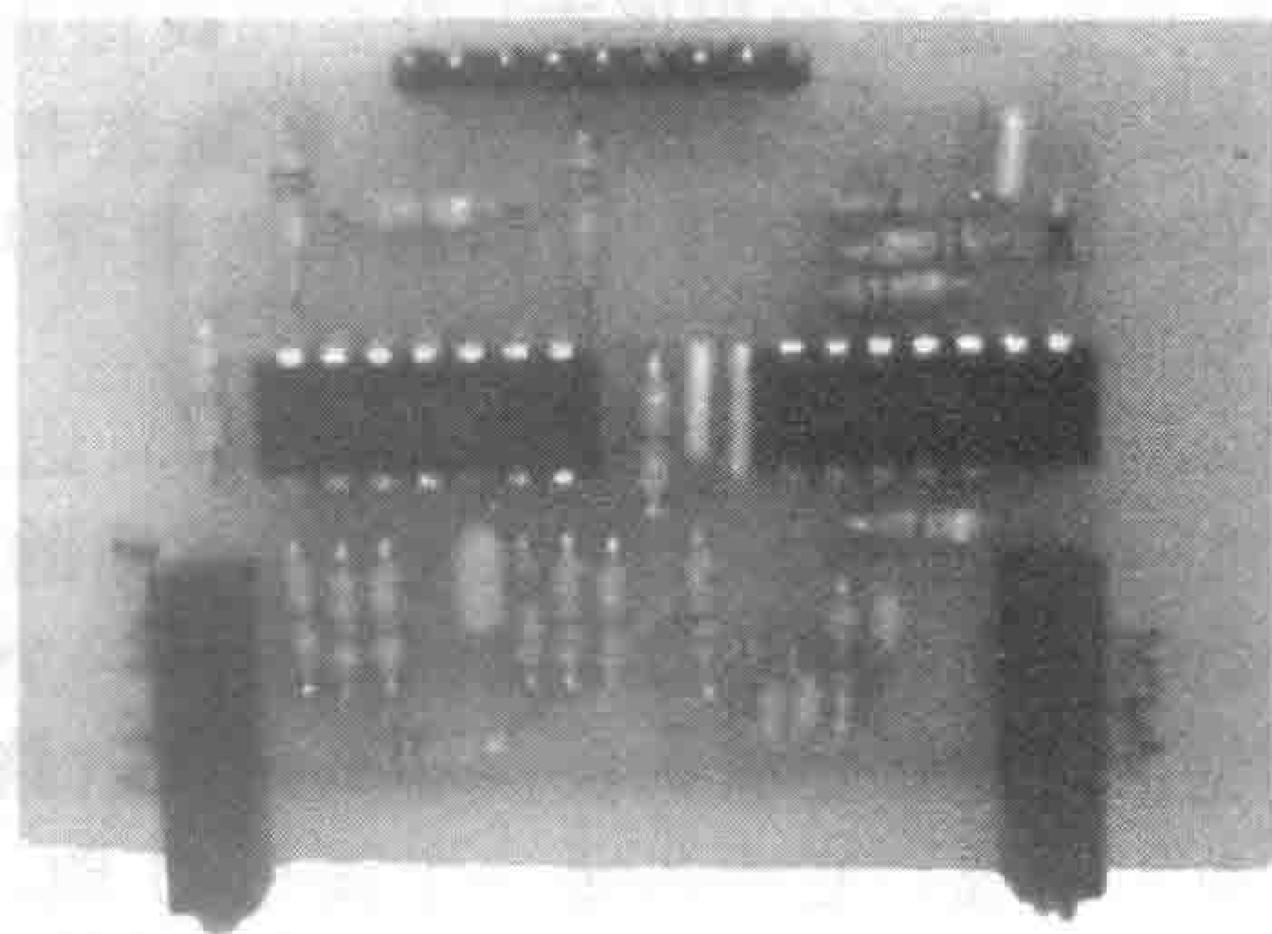


图 11-19　调理电路图

信号调理电路的输出与 PIC16F819 的一个模拟端口相连。与 PIC16F84 一样，除了 PIC 运行所需的电路系统以外，只需该模拟输入和一根连接 MAX232 芯片的 TTL 输入与数字引脚的导线。然后，一根导线将 MAX232 的 RS-232 输出与计算机串口的引脚 2 相连接。同样，一根导线将 MAX232 芯片 RS-232 输入与串口的引脚 3 相连接。相应的 TTL 输出连接到 16F876 的数字引脚与 PIC 接口。图 7-13 所示为 LCD 与 PIC 的接线示例图。

Adept 机器人输入端口输出逻辑 1 至少需要 9V 电压。在每个 PIC 的输出 PORT A，晶体管和独立的电源(如正电压源用于操作放大器)一起使用来帮助提高电压。图 11-20 所示为如何将 PORT A 引脚与对应 Adept 机器人的输入引脚相连接的原理图。应该注意的是，该电路进行了逻辑取反。如果 PIC 的输出为高，则晶体管将会饱和，且 Adept 的输入将接地。相反，如果 PIC 的输出为低，则晶体管将关闭并没有电流流过。如果在 10kΩ 的电阻上没有压降，Adept 的输入将保持 9V。该负逻辑必须在 Adept 代码中加以考虑(或者，在 PIC 代码中)。

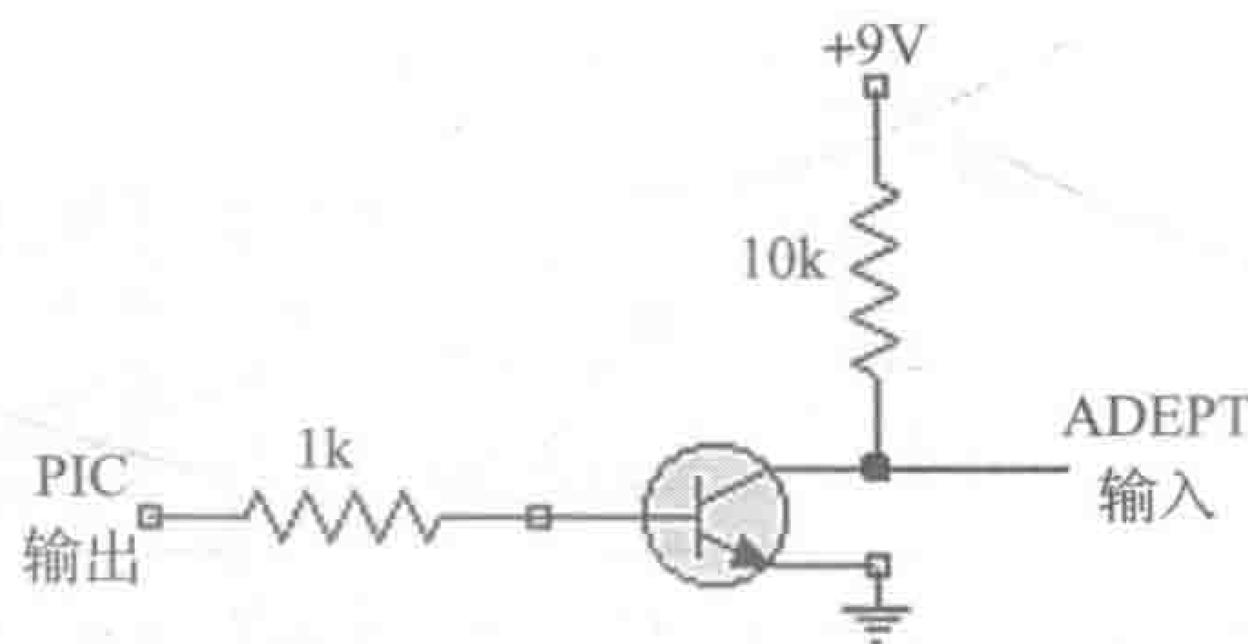


图 11-20　PIC 与 Adept 的连接电路

7. 绘制程序流程图

图 11-21 所示为 A-D 转换器 PIC 工作流程图。待变量初始化和 A-D 转换完成后，剩余的工作就是 A-D 转换器的连续采样和通过串口引脚发送数据的简单循环了。

图 11-22 所示为 PIC 接口操作的流程图。PIC 在串口引脚上等待接收 2 字节数据(估计力和栈号)，在 LCD 上显示这些值，并通过 PORT A 输出栈号。除了在 LCD 上显示信息以外，PIC 本质上是一个串行到并行的转换器。而该并行值就是机器人所读取的数据。

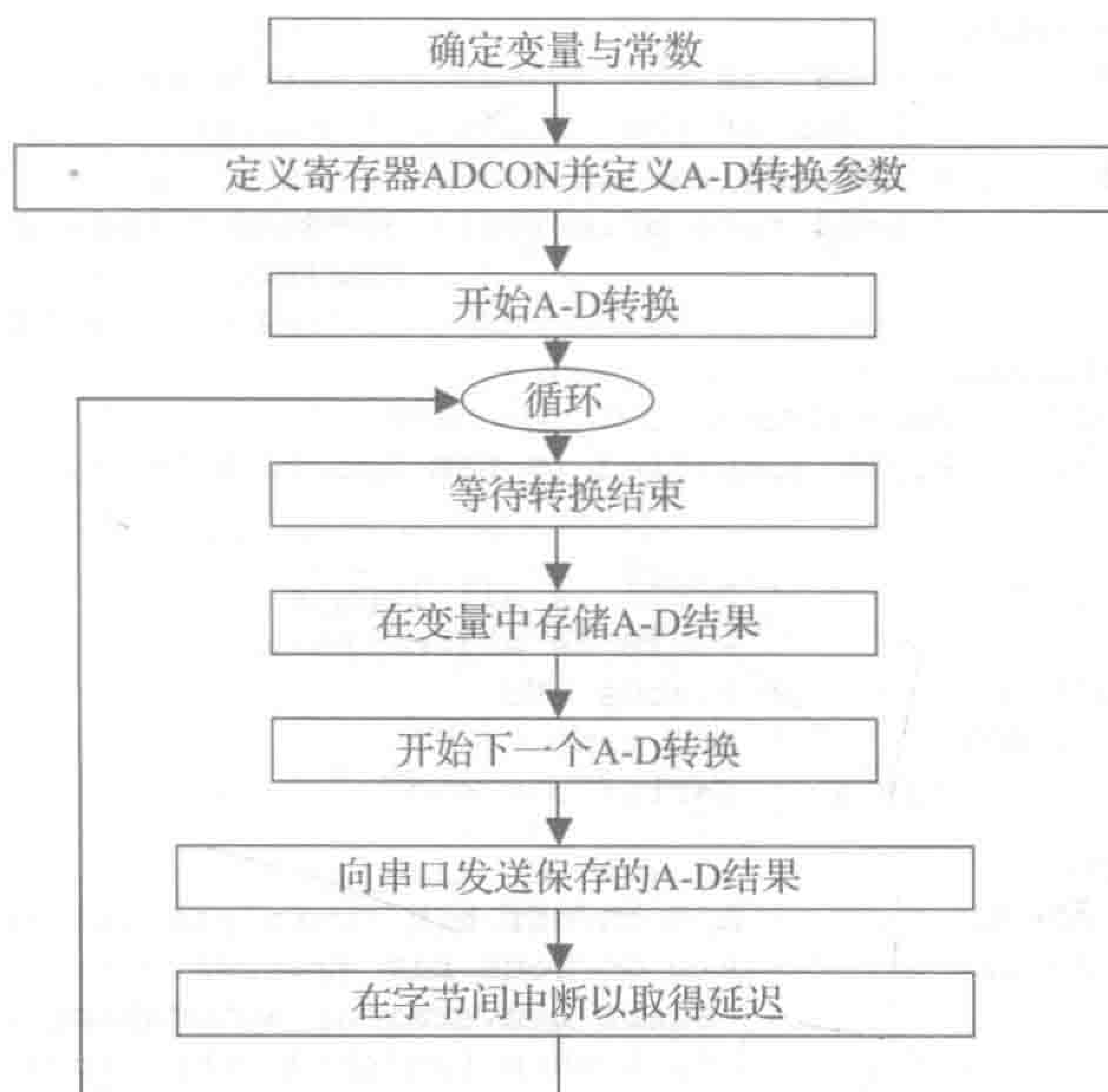


图 11-21　PIC A-D 转换器流程图



图 11-22　PIC 接口流程图

8. **编写代码**

PIC 是 8 位处理器，因此任何超过 8 位的整数值(255＋)必须存储在两个或两个以上的寄存器中。因为 PIC16F819 执行 10 位的 A-D 转换，所以结果存储在两个寄存器 ADRESL 和 ADRESH 中。任何一个寄存器都可以选择如何“验证”结果：要么 8 个最不重要的位放在一个寄存器中，要么 8 个最重要的位放在一个寄存器中。其他两位填充零。验证、转换、初始化转换器以及其他 A-D 参数在 ADCON0 和 ADCON1 寄存器中定义(有关更多信息，请参见 PIC16F819 数据手册)。PIC 的 A-D 转换器代码如下所示。

```
'*****************************************************************
'* Name    : ADC.BAS                                             *
'* Version : 2.0                                                 *
'* Notes   : PIC16f819                                           *
'*         : Reads analog value, serially sends binary result    *
'*****************************************************************
DEFINE OSC 20 ' 20MHz crystal
```

```
' INITIALIZE VARIABLES
ADC_LSB VAR BYTE      ' 8 LSB of the 10 bit A/D conversion
ADC_MSB VAR BYTE      ' 2 MSB of the 10 bit A/D conversion (in bits 0 & 1)
i       VAR BYTE      ' looping variable
serMode CON 6         ' baud rate of serial; 84=9600  bps (driven true)
                      '                     32=19200 bps (driven true)
                      '                      6=38400 bps (driven true)
' SET UP A/D REGISTERS
ADCON0 = %10000000  ' TAD=32Tosc, A/D pin=RA0
ADCON1 = %10001110  ' Right justified (8 LSB are in ADRESL, 2 MSB are in ADRESH)

' DEFINE PORTS
TRISA = %11111111             ' PORTA is all inputs
TRISB = 0                     ' PORTB is all outputs
SYMBOL LED = PORTB.3          ' Status LED
SYMBOL ADC_pin = PORTA.0      ' A/D pin
SYMBOL SERIAL_pin = PORTB.4   ' Serial out pin

' RENAME REGISTERS
SYMBOL ADC_on = ADCON0.0      ' A/D on/off bit (turn off to save power)
SYMBOL ADC_go = ADCON0.2      ' A/D Go/Done bit (manually set to 1 to
                              '  start conversion; automatically is reset
                              '  to 0 when finished with conversion)

initialize:
  ADC_on = 1          ' turn the ADC channel on
  PAUSE 250           ' let things settle a bit (probably not necessary)
  HIGH LED            ' turn on LED to indicate ADC in process
  ADC_go = 1          ' start the 1st A/D conversion
  GOSUB getADC        ' wait until it's done
main:
  ADC_go = 1          ' start the next A/D conversion
  GOSUB sendADC       ' send the data whilst doing the A/D conversion
  PAUSEUS 126         ' pause 126 us (results in 1500 Hz sampling rate)
  GOSUB getADC        ' get the results of the A/D conversion
GOTO main             ' do it forever

getADC:
  WHILE (ADC_go ==  1)    ' wait until the conversion is done
  WEND                    ' (should already be done, because SEROUT takes a while
  ADC_MSB = ADRESH        ' save 2 most sig. bits (padded w/ 0s)
  ADC_LSB = ADRESL        ' save 8 least sig. bits
RETURN

sendADC:
  SEROUT2 serial_pin, serMode, [ADC_MSB]     ' send the MSB (padded with six 0s)
  SEROUT2 serial_pin, serMode, [ADC_LSB]     ' send LSB
RETURN

END
```

除了 DEFINE 语句外，大部分 PIC 接口代码(见下文)是无须证明的。DEFINE 用于改变 PicBasic Pro 中的预定义元素。例如，PicBasic Pro 假定有 4MHz 时钟和一组特定引脚与 LCD 连接使用。如果使用的是 20MHz 的晶振和不同配置的引脚，那就需要定义新的参数。指定 DEFINE OSC 20 的目的是为了让 PicBasic 知道去改变所有时效性命令(如中断等)。如果不这样做，这些命令会按 5 倍的速度运行或根本不工作。

```
'*****************************************************************
'* Name      : PC2PIC.bas                                        *
'* Version   : 2.0                                               *
'* Notes     : PIC16F876                                         *
'*           : Reads two values from serial pin, displays them   *
'*           : on an LCD, and converts one of the values to a // *
```

```
'*          : value on PORTA                                           *
'*******************************************************************

' make sure to set Configure | configuration bits | oscillator - HS
'  before programming (if using 20Mhz osc)

ADCON1 = %11000110           ' turning all of porta to digital
TRISA = %00000000            ' turning all of porta to outputs

DEFINE OSC      20           ' 20 MHz oscillator
DEFINE LCD_DREG PORTB        ' LCD data port
DEFINE LCD_BITS 4            ' 4 parallel data bits
DEFINE LCD_DBIT       0      ' data bits on PORTB.0 -> PORTB.3
DEFINE LCD_RSREG      PORTC  ' Register Select (RS) port
DEFINE LCD_RSBIT      6      ' RS on PORTC.6
DEFINE LCD_EREG       PORTC  ' Enable (E) port
DEFINE LCD_EBIT       7      ' Enable on PORTC.7
DEFINE LCD_LINES      2      ' 40X2 LCD Display
DEFINE LCD_COMMANDUS 3000    ' command delay time (us) {found
                             ' experimentally 3000}
DEFINE LCD_DATAUS 75         ' data delay time (us) {found experimentally 75}

SYMBOL  LED=PORTB.7          ' Status LED
SYMBOL  serin_pin=PORTB.6    ' serial in pin

i          var    byte       ' looping variable
command    var    byte       ' 1st byte received from serial pin
force      CON    byte       ' 2nd byte received from serial pin
mode       CON    6          ' serial mode (6=38400 baud)

LCDOUT $FE, 1                ' clear LCD
for i=1 to 8                 ' flash the status LED
     high LED
     pause 100
     low LED
     pause 100
next i

porta = 0
pause 1000
high LED
pause 500

''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
'      EMG              |     Force: ## lbs
'Signal Strength        |     Level: #
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

LCDOUT $FE, 128, "      EMG            |     Force:      lbs"
LCDOUT $FE, 192, "Signal Strength      |     Level: "

main:
     SERIN2 serin_pin, mode, [command, force]  ' get 2 serial values

     LCDOUT $FE, 128+31, #force
     LCDOUT " "
     LCDOUT $FE, 192+31, #command
     LCDOUT " "

     'convert serial value to parallel value on portA (for ADEPT robot)
     PortA = command

goto main
```

9. 系统构建与测试

对于任何系统尤其是复杂系统来说，测试部分是至关重要的。把系统分解为最小的功能单元，对其输入和输出进行测试以确保达到预期性能。例如，对于信号调理电路来说，通过输入正弦波并确认输出信号是否整流来测试全波整流器。同时，每个滤波器可以通过输入扫频并确认截止频率的振幅是否为输入振幅的 70.7%左右进行测试。

可以通过一个状态灯来表示 PIC 是否工作及运行程度。当排除故障时，也可以使用闪烁的 LED 在不同状态下的代码来帮助跟踪执行。LCD 在运行和调试代码时是非常有用的，因为它们可以很容易地显示诊断消息并将相关值存储在变量中。

PIC 和计算机之间的串行通信可以使用终端程序来进行测试。超级终端(与 Windows 捆绑的终端程序)允许用户从串口上读写数据。用户只需确保指定的端口设置(如波特率)，这样就可以匹配 PIC 发送或接收的格式。

对于系统中的每个单元，都可以给出对应的示例，但关键是如何逐步构建和测试所有的组成部分。

此外，视频演示 11.6 所示为操作系统的示例。

11.5 案例研究 2——硬币计数器的设计

在本节中将提出以下设计问题的解决方案：设计一个含有机电设备的硬币计数器，使该计数器能够接受少量美元硬币，将硬币按一定的顺序进行排列，并通过传感器阵列确认每枚硬币的面值。与传感器输出相连接的是电子设备，它可以计算硬币的数量和硬币的总价值，并将这两类数字以某种多路复用的方式在显示设备上显示给用户。

这个设计分配给 80 名机电类的初学者，他们分为 4 组，其中一半以上的讨论组在规定的设计周期(6 周)内成功地完成了设计工作。所有组都能够使得硬币按顺序排列并显示计数的硬币数量。但在一个显示屏上多路显示硬币的面值和数量更具挑战性，在这个设计过程中需要创造性地利用数字逻辑，所以并不是所有组都成功地完成了这部分设计工作。当给更多的时间让他们再次设计时，大多数组都能成功完成设计工作。正如你将看到的，该问题的解决办法并非唯一，设计是多种多样的。

这个问题有两个重要部分：一个机电硬币演示系统的设计，它能够以某种方式对硬币进行排序，所以他们可能会需要一系列的传感器；同时需要设计一个电子计算器，它能够使用传感器的数据来显示硬币的数量和面值。通过这两个部分来对设计成果进行评价，通过观察发现，设计团队经常将硬币的机械设计部分与计数器的电气设计部分独立开来。有显著机械相关经验的学生主要对硬币收集等机械部分进行研究，而对电气部分更为熟悉的同学则对传感器和计数器的设计进行研究。在设计过程中，分配责任、沟通进展、保存文档及保证各子系统之间的兼容性都是非常重要的。不想偏离设计过程本身，团队协作和沟通在设计过程中与设计是一样重要的工作。

设计的机械组件部分需要一个空间来接受少量混合面额的硬币，利用机械原理来单独选择硬币，并将其传送到传感器阵列上以读取其属性和输出数字信号。通过观察现有的机械硬币分类器，许多学生设计了倾斜旋转圆盘，该机械结构中有圆形洞来帮助接受单个硬币。图 11-23 所示为一些硬币收集器的机械系统设计示例。三种方法中有两种(见图 11-23a、c)使用一个直流电动机旋转穿孔圆盘来存入一个硬币的。随着圆盘的旋转，硬币会落入包含传感器的阵列槽中。大多数设计都是通过直流电动机来持续旋转圆盘的。其他的设计(如图 11-23b 所示)主要包括振动槽和类似于弹球盘的机械数组。在此过程中，硬币会单独分开，然后进入一个滑槽并从包含传感器阵列的矩形槽中滚下来。

尽管人们通常是通过视觉和感觉来决定硬币价值的，但自动化方法则需要一个设计良好的传感系统。不同面值硬币所对应的大小、重量及厚度都是独一无二的。为了简单

起见，所有组选择使用一组光敏晶体管-光敏二极管来设计一个直径传感器。这些光对都能实现仔细定位，因此不同面值硬币的组合信号将是独一无二的(见图 11-24)。对于这个项目来说，硬币面额仅限于一美分和五美分和二十五美分，即可以提供大小上的差异。假设硬币能够顺利落入槽的前提下，直径是评估每个硬币面值的主要参数。这意味着面值最大的硬币将会激活所有的传感器，而最小的硬币只能激活一个传感器。此外，来自传感器的信号脉冲宽度取决于硬币的大小和对速度的影响。脉冲不能同时开始或结束(见图 11-25)，因为这样会使评估单元和计数器的逻辑设计更加复杂。通过使用 7404 施密特触发器可以使传感器的输出转换为 TTL 信号，从而使得输出与电路设计的计算部分兼容。

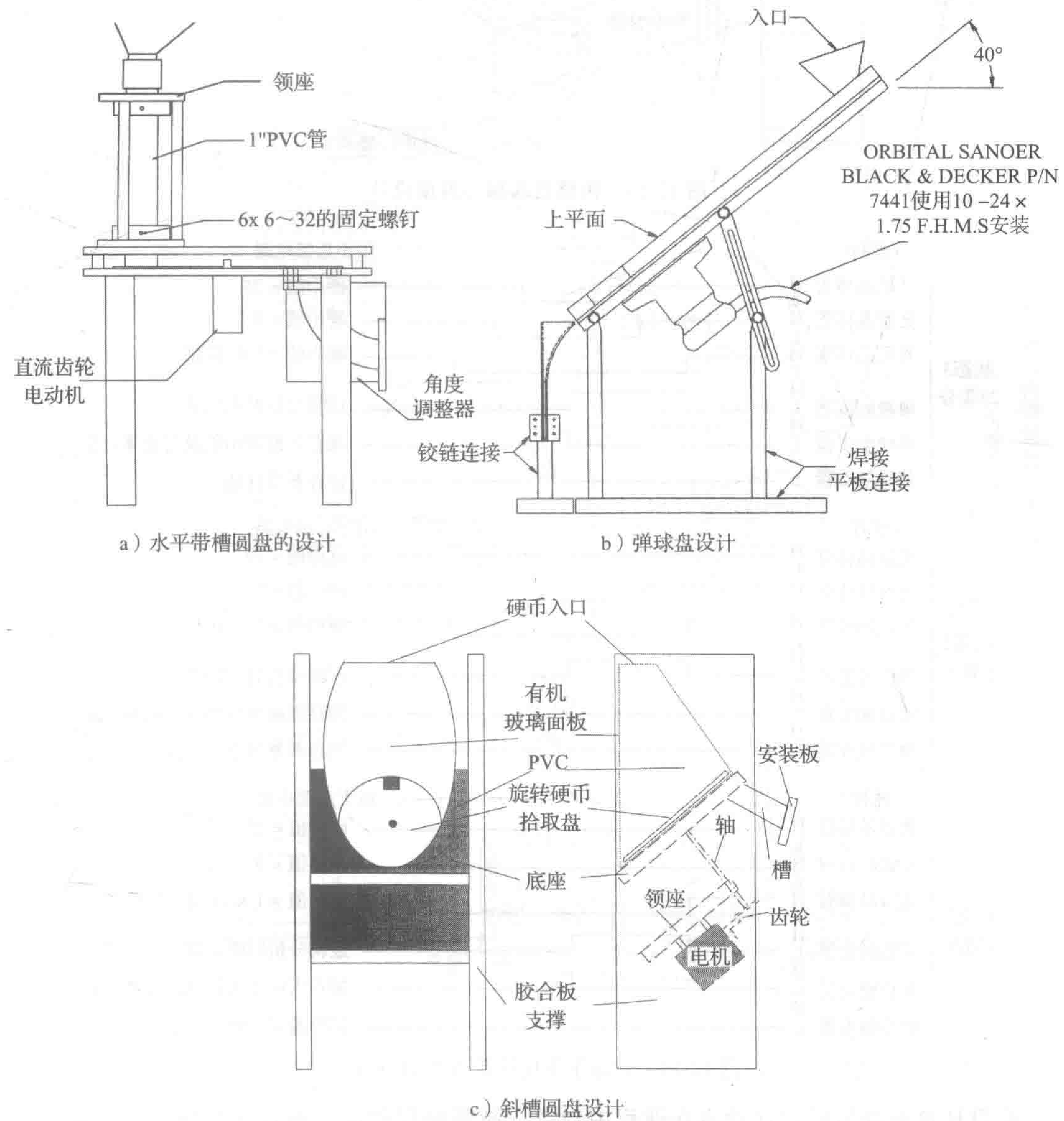


图 11-23 硬币计数器运行机理

传感器在不同起始时间和持续时间内所产生的脉冲取决于硬币的大小和速度。因此需要仔细地设计时序逻辑来确保硬币识别过程的准确性。如果传感器的 TTL 信号同步，那么不同面额的硬币的布尔表达式可以表示为：

$$X = A \cdot B \cdot C \tag{11-14}$$

$$Y = A \cdot B \cdot \overline{C} \tag{11-15}$$

$$Z = A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \tag{11-16}$$

其中，C 为顶端传感器的输出；B 为中间传感器的输出；A 为底端传感器的输出。X 对应于二十五美分，Y 对应于五美分，Z 对应于一美分。

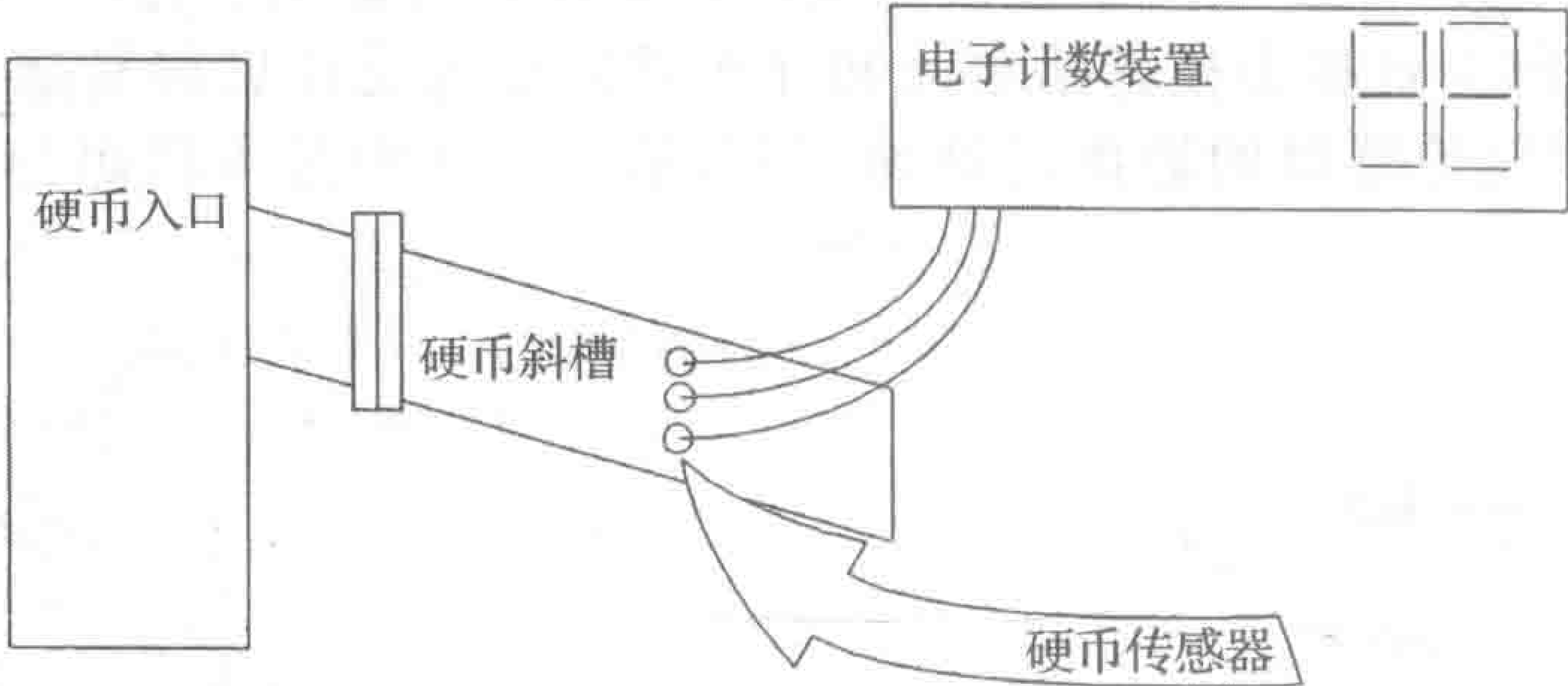


图 11-24 传感器阵列与斜槽设计

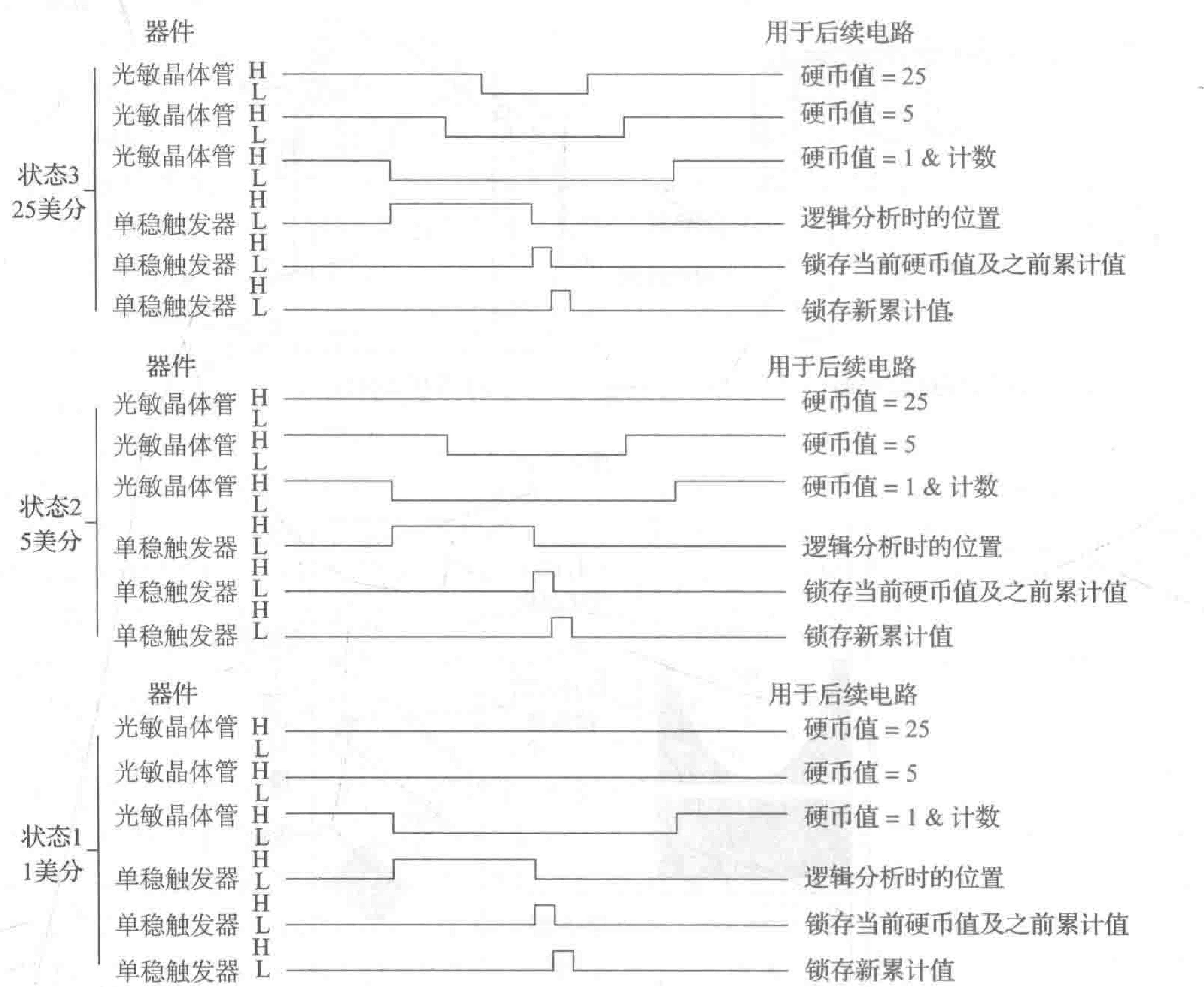
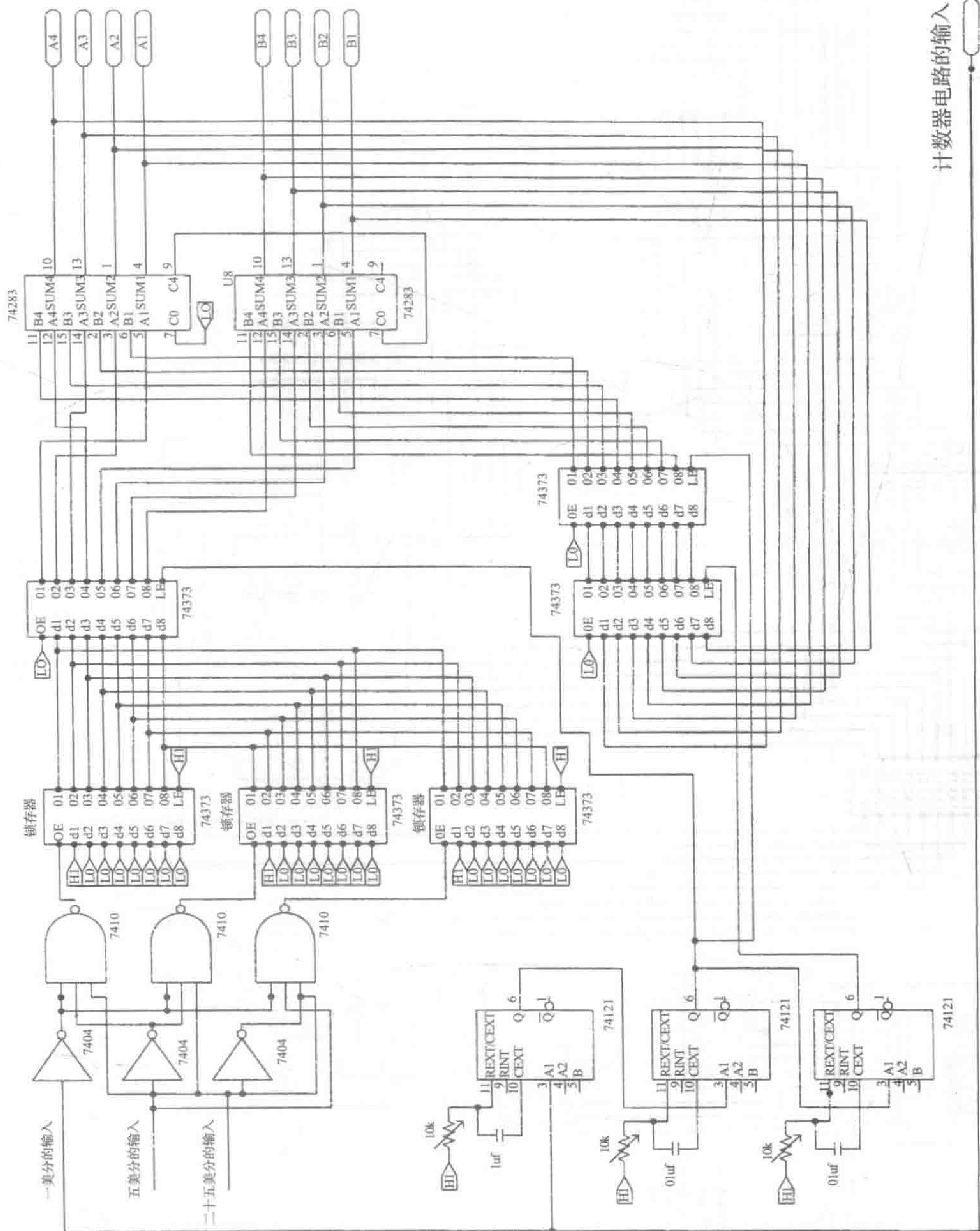


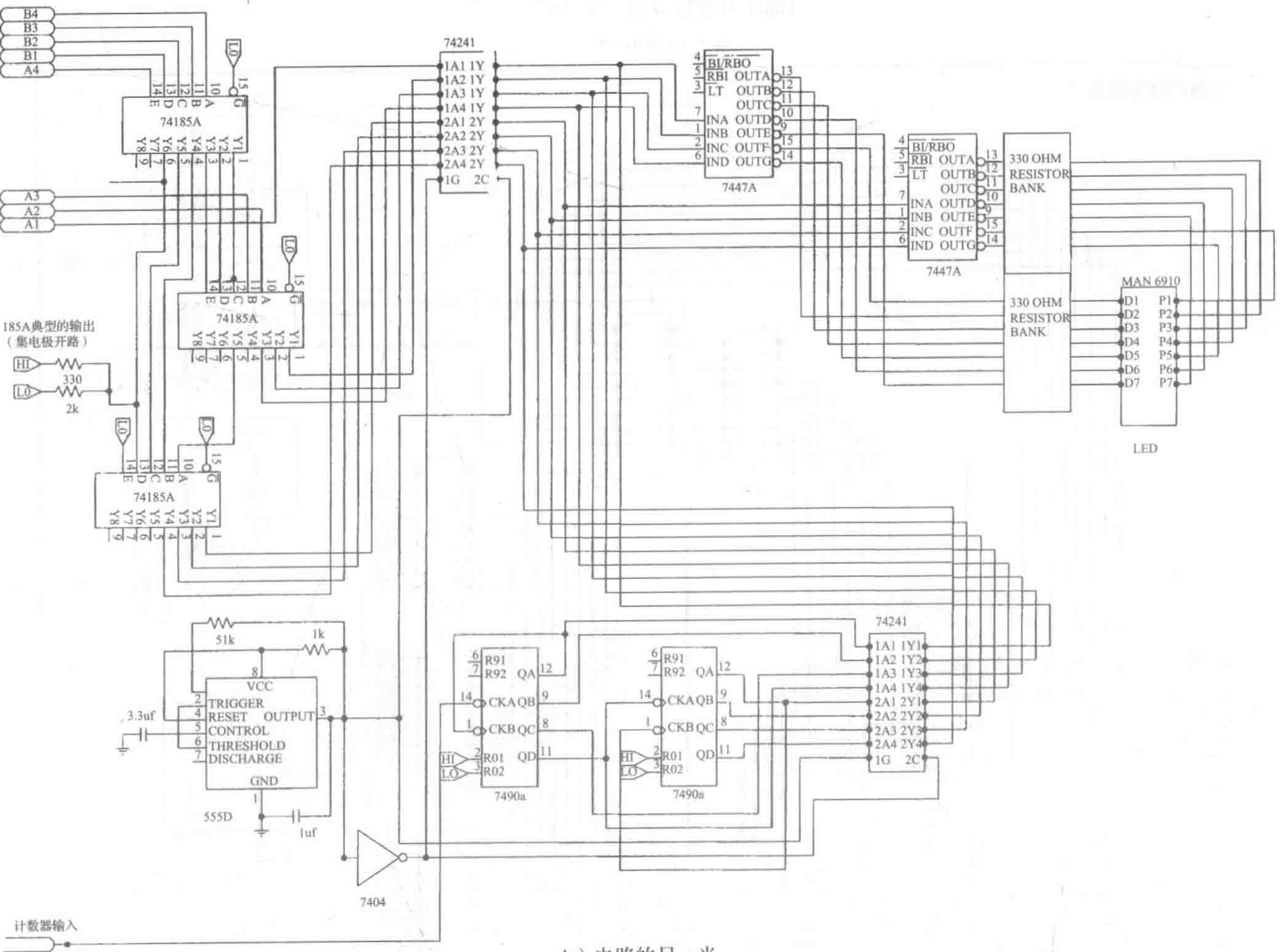
图 11-25 对应于不同硬币的 TTL 输出

在设计这个项目时，还没有在课程中对微控制器编程和接口内容进行教学。因此学生使用基本的 TTL 集成电路解决方案作为替代。组合和时序逻辑用来决定硬币的面值并显示对应面值的输出值。学生们有许多的设计方案。图 11-26 和图 11-27 所示为两组的硬币计数处理器和显示电路的解决方案。输出传递到数字显示驱动器上以多路电路来统计当前硬币的数量和累积值。



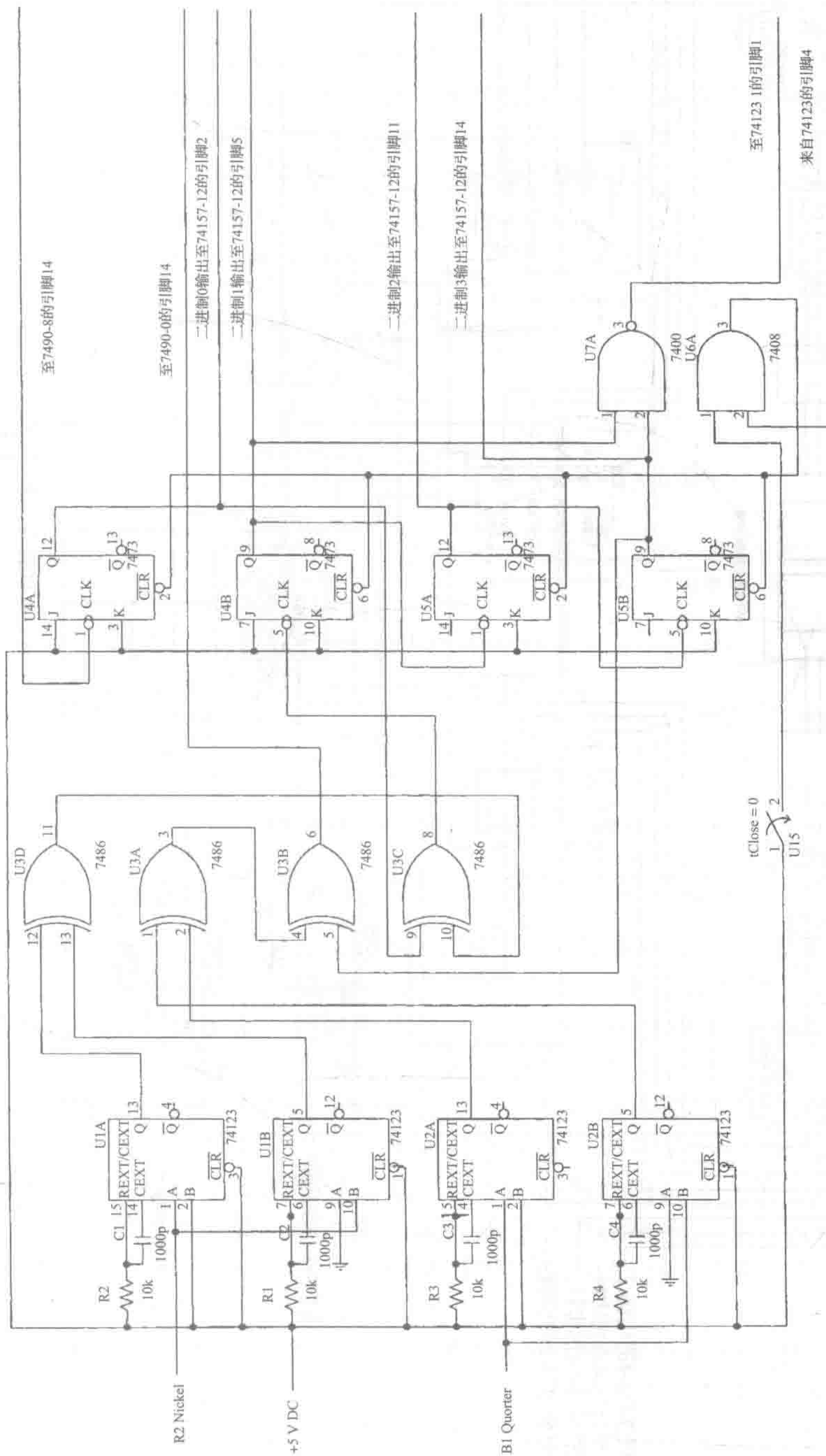
a）电路的一半

图11-26　计数器设计电路1



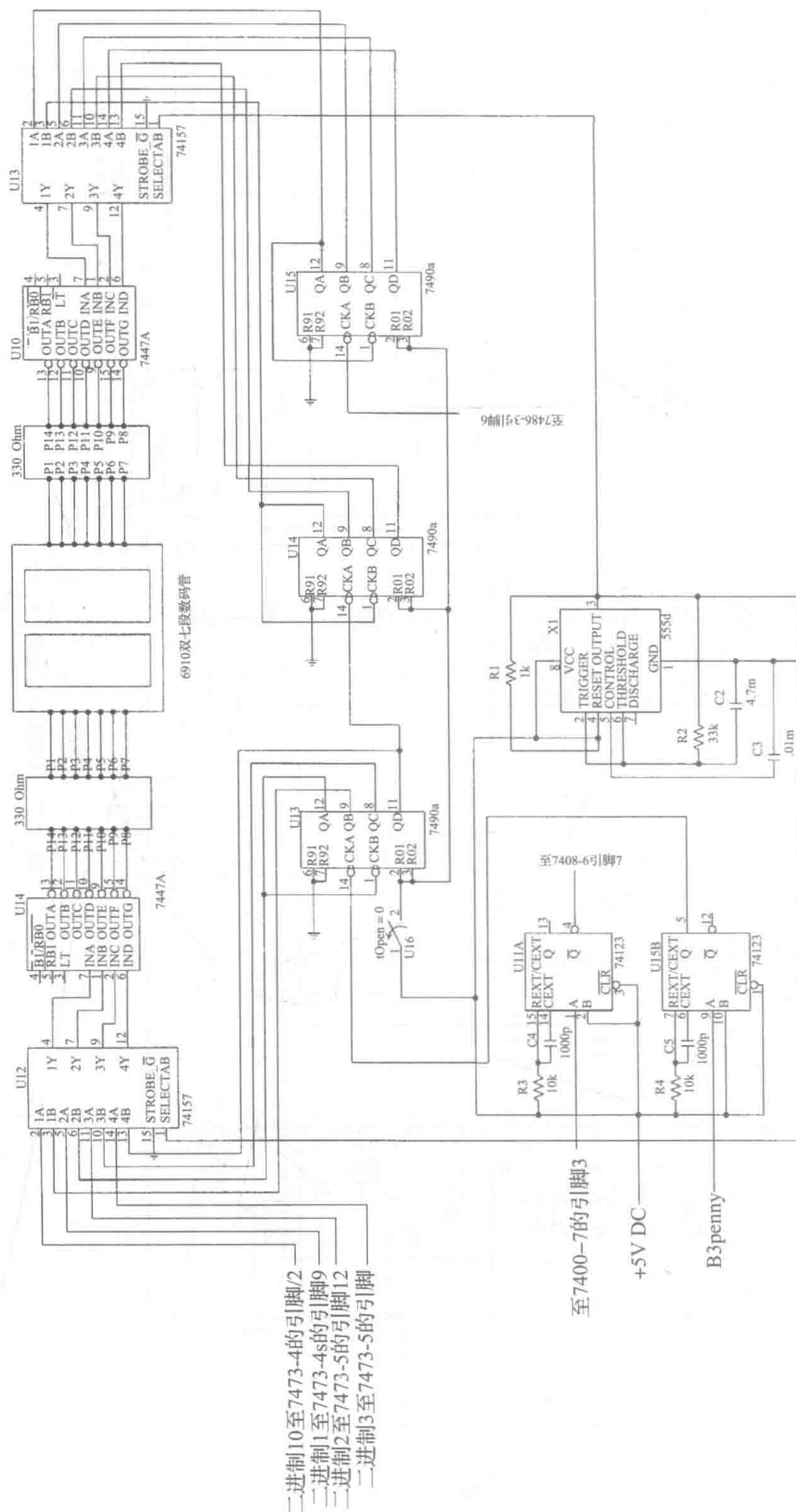
b）电路的另一半

图11-26　（续）



a）电路的一半

图11-27　计数器设计电路



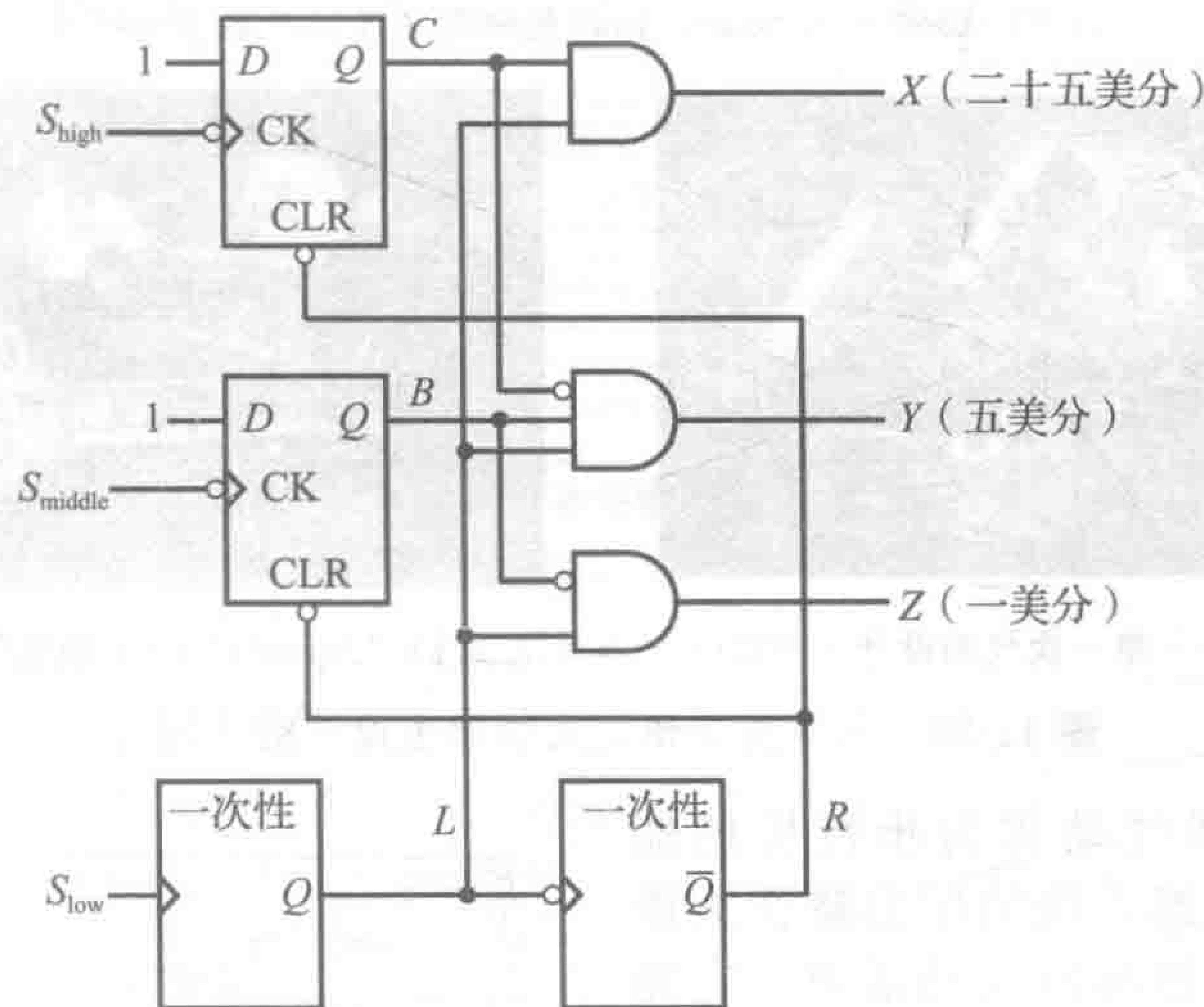
b）电路的另一半

图11-27（续）

课堂讨论项目 11.2　硬币计数器电路

图 11-26 所示为一个学生组设计的硬币计数器的电气原理图。设计中使用了一次性门电路来估计硬币的面值并计算面值的总和。在前半部分的输入电路中存在错误，这部分电路主要用来确定硬币为一美分、五美分还是二十五美分。错误出现在组合逻辑电路部分。基于图 11-25 所示的时序图，逻辑电路将无法正确识别硬币。

即使逻辑是正确的，设计也仍然有问题，其主要原因是只有一次的脉冲长度是固定的，但传感器的脉冲宽度取决于硬币在设备中传输的速度。时序逻辑电路可以明确识别硬币的面额。画一个时序图来验证该时序逻辑电路是一个稳定的设计。图中主要包括信号 S_{low}（低传感器）、S_{middle}（中间传感器）、S_{high}（高传感器）、B、C、L、R、X、Y 及 Z。请参考图 11-25 所示的光敏晶体管传感器的信号时序图。



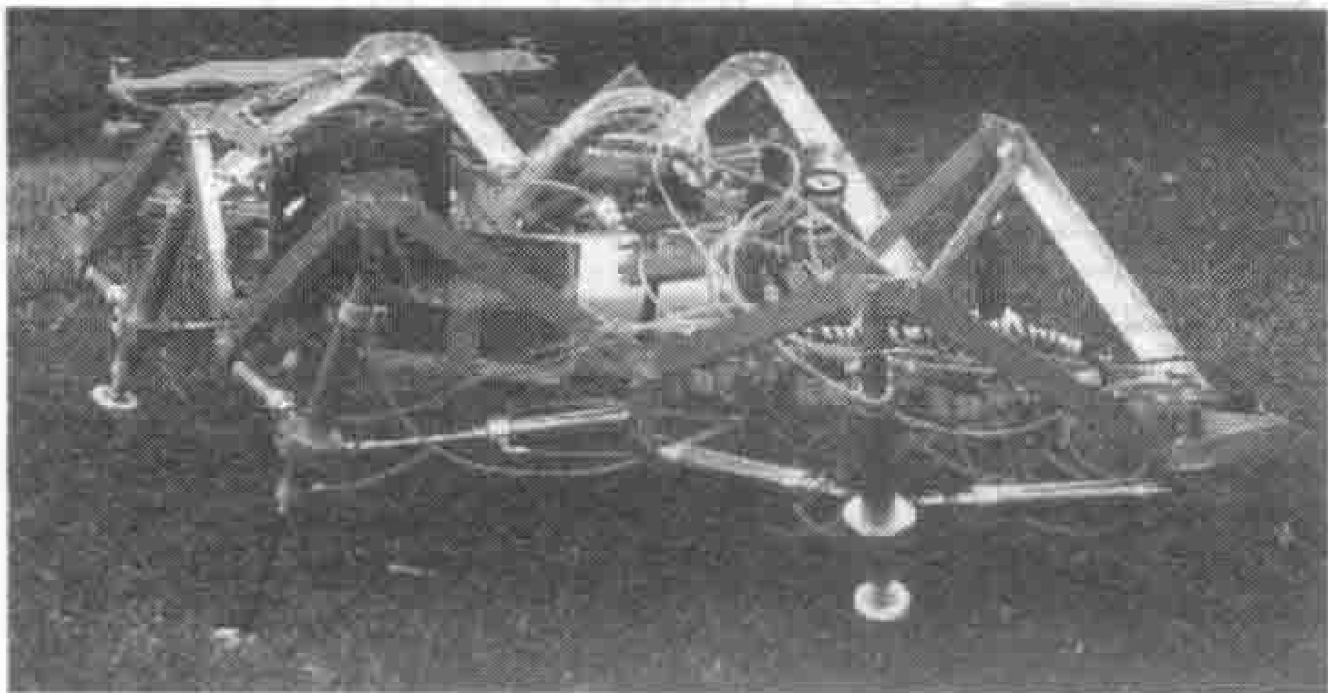
11.6 案例研究 3——机器人步行机的机电一体化设计

在本节中将研究一个铰接步行机的机电一体化设计案例。该案例最早出现在 1994 年本科工科学生的机电一体化课程这本书中。1987 年，汽车工程师协会(SAE)开始每年赞助机器人步行机十项全能大赛，让来自不同大学的团队挑战设计一种可以执行 10 个不同动作的铰接步行机，包括短跑、障碍滑雪、避障及跨越等。也就是说，这些事件中的一半包括步行运动和避障，它们需要有人操作的控制开关箱进行控制。另一半动作事件则需要通过自主控制加以完成，即没有人为干预的程序系统。多年来，我们已经看到许多不同的步行机设计，一些非常简单，能够完成几个事件，而有的则具备完成一些复杂和创造性事件的能力。这种比赛的兴奋和乐趣来源于设计概念及功能规范。这里的目的不是研究步行机的品种，而是通过一个具体的设计实例来说明机电一体化的应用。首先介绍 3 种不同的步行机，它们都赢得了全国的 SAE 比赛(见图 11-28)。

现在介绍一个 1994 年科罗拉多州立大学学生设计的步行机的案例，这个设备融合了无处不在的智慧，并命名为 Airratic。这个设计是 1992 年第一个气动设计的详细化，体现了七年内机电设计的迅猛发展。而对气动设计，学生们不得不关注一个全新的设计约束：提供储能、压缩空气；通过气动缸来控制铰接腿的机械运动；分配和控制空气；控制压力；根据计算机设定的命令来减少协调步行运动；连接计算机与气动控制系统；减少机器的重量和大小；确保系统的安全，包括机器上的避障传感器；使得机器人在测试阶段就具备设计的多变性和适应性。



a）“Lurch”——Scotch yoke 机械腿的设计方案(1989)



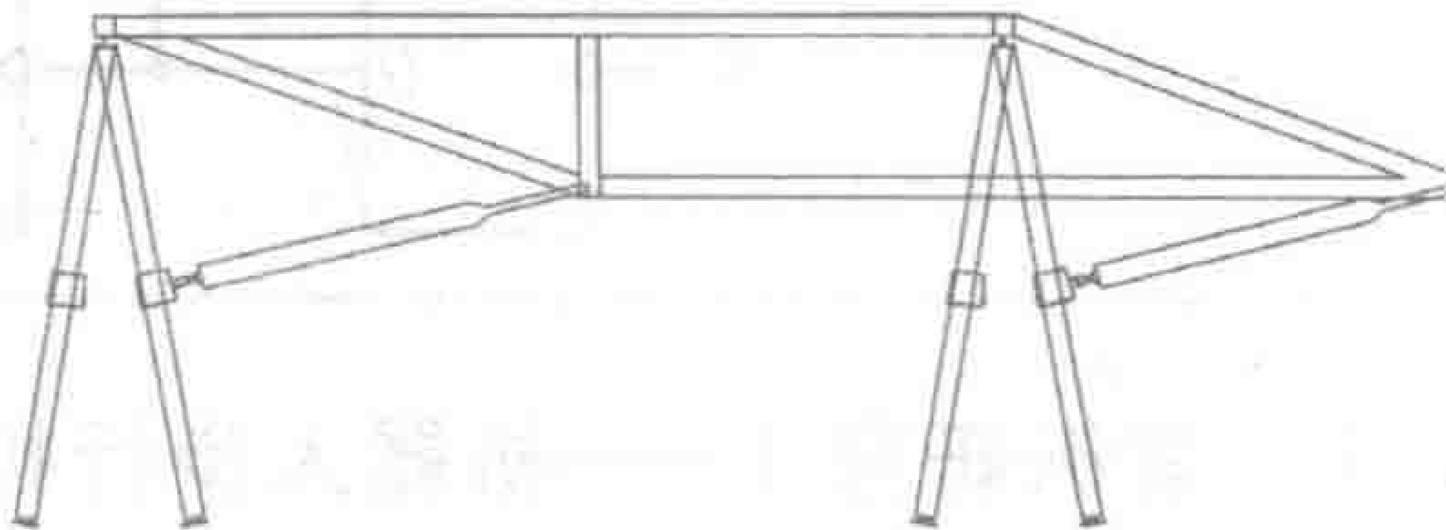
b）“Airachnid”——第一次气动设计（1992）



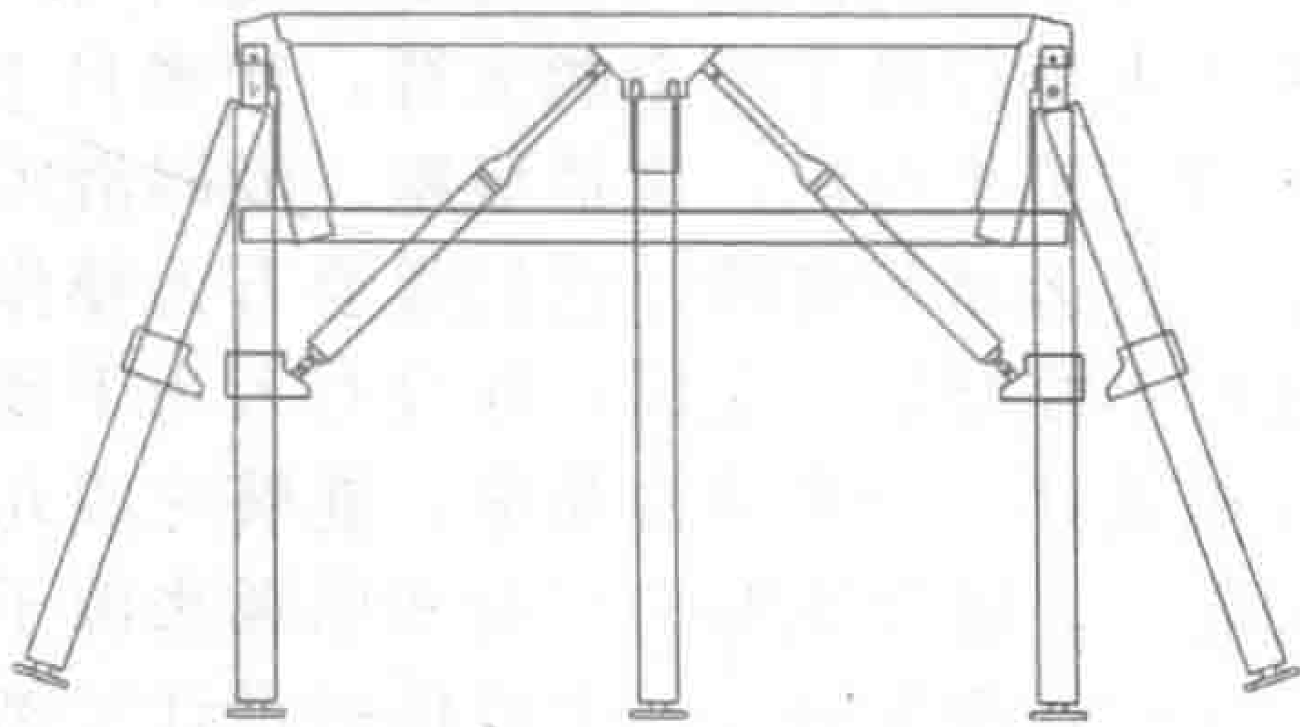
c）“Airratic”——细化气动设计(1994)

图 11-28　科罗拉多州立大学学生设计的步行机

因为设计师选择气动作为步行机的能源，因此一个机载纤维缠绕的压力罐作为能源装置，从而策略性地控制气动活塞，它能控制腿的位置和运动。如图 11-29 所示，步行机的骨架结构由 16 个双作用汽缸焊接组成。四个角落的腿有 3 个自由度，前后中心腿有两个自由度。通过 16 个汽缸的协调控制，6 条腿的机械设计和控制算法可以使得机器人容易的完成向前、向后、侧向一边、对角运动、全部直立及全部趴下的动作。包括一个轴向汽缸的每条腿可以伸出或缩回。其他 10 个汽缸排列在水平面的不同位置。



a)侧视图



b)主视图

图 11-29　铝架和伸缩气动腿

为了保证静态稳定性，机器必须至少由 3 条腿支撑，而运动过程则需要 6 条腿。大多数步行运动可以分解为两组 3 条腿的协调运动，称为第一组腿和第二组腿。图 11-30 显示了开发一种协调运动控制代码的流程图，该组运动为机器的前进运动。

控制系统的主要工作是通过计算机控制的电磁线圈来完成 16 个气动缸的协调运动。每个电磁线圈开关空气将其从主汽缸的一端流动到气动缸一端并在另一端释放掉有压力的空气，如图 11-31 所示。在每个电磁线圈上通过手动调整针形阀来控制汽缸的动作速度。

图 11-30 所示为微处理器解决方案的复杂流程图。这和类似的流程图命令对于设计控制以协调运动的计算机代码来说是非常有用的。机载计算机通过 74373 三态反相缓冲接口

芯片来控制电磁线圈，并从一个计算机上的 8 位端口来接收信号。如图 11-32 所示，通过 8 位端口的多路复用来为汽缸的协调控制提供 18 个字节的信息。

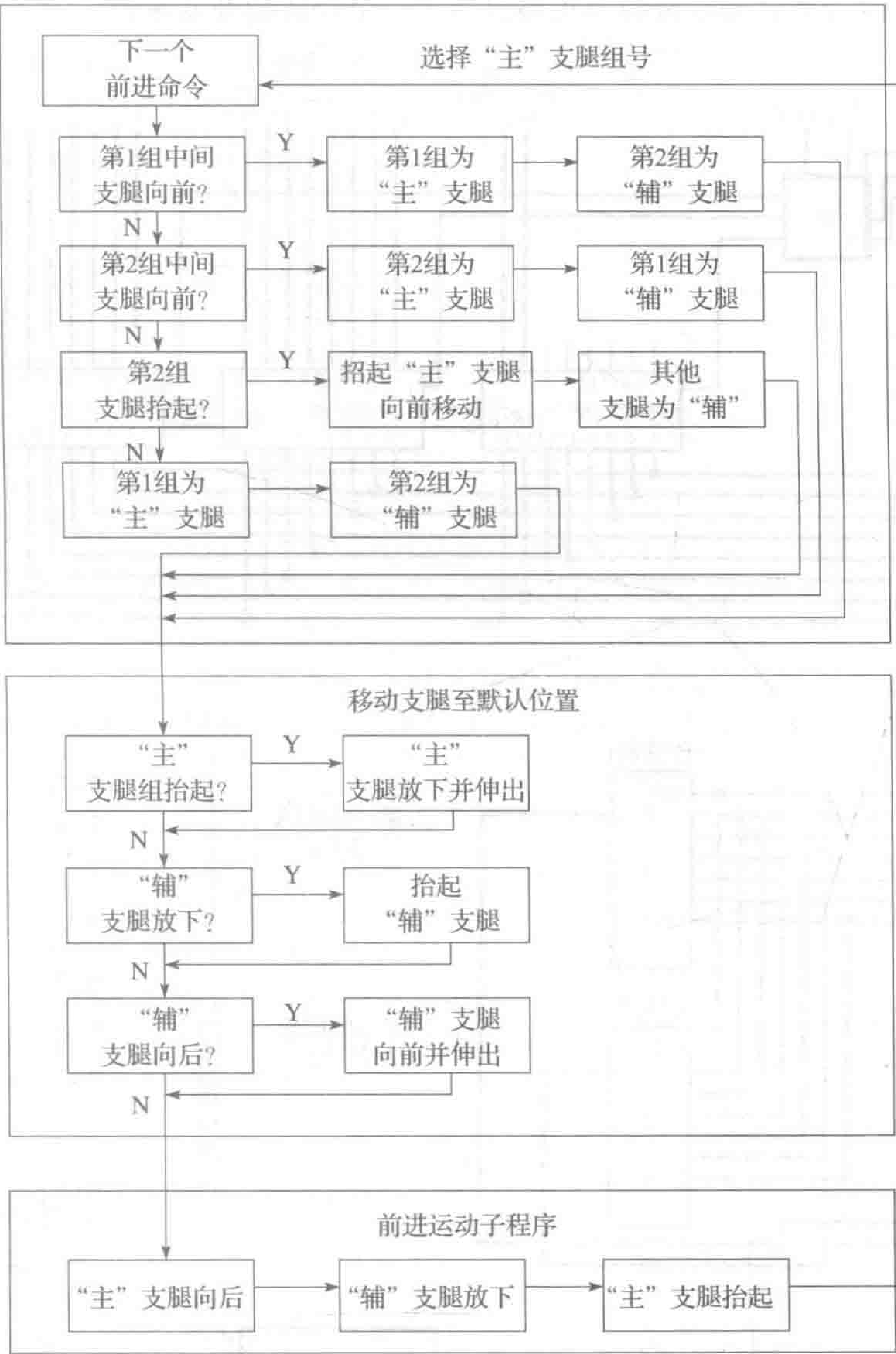


图 11-30　前进运动的流程图

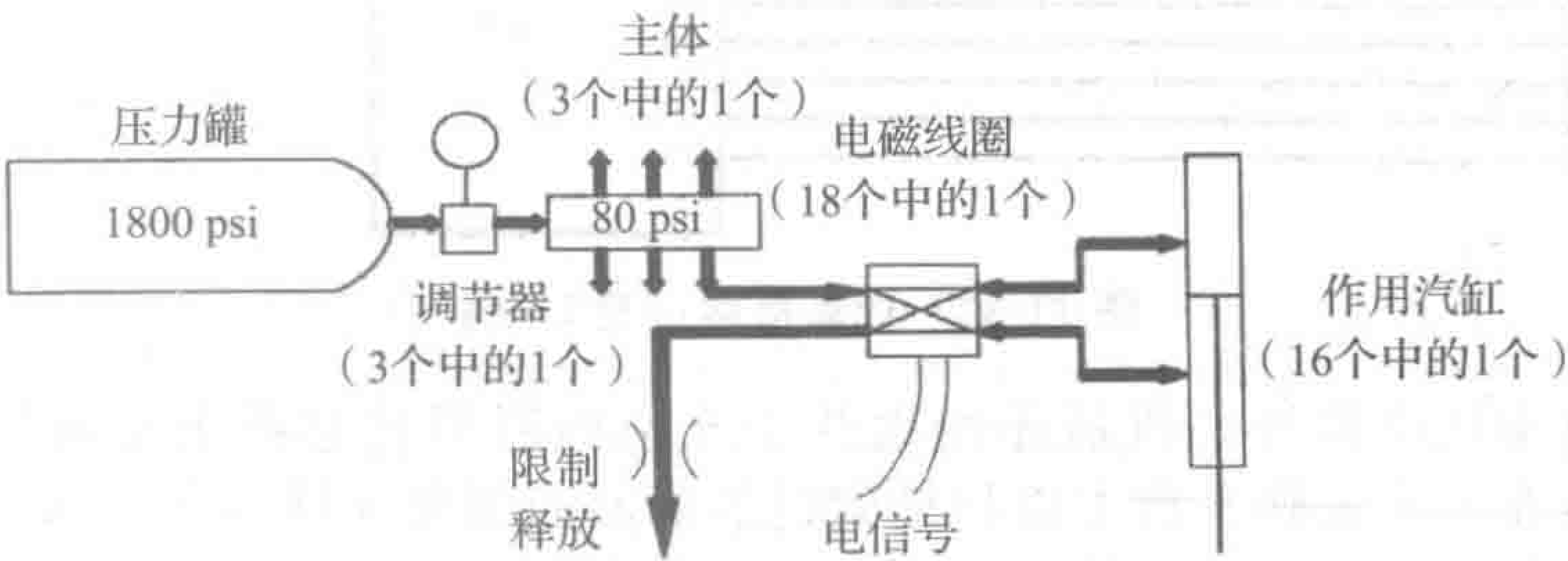
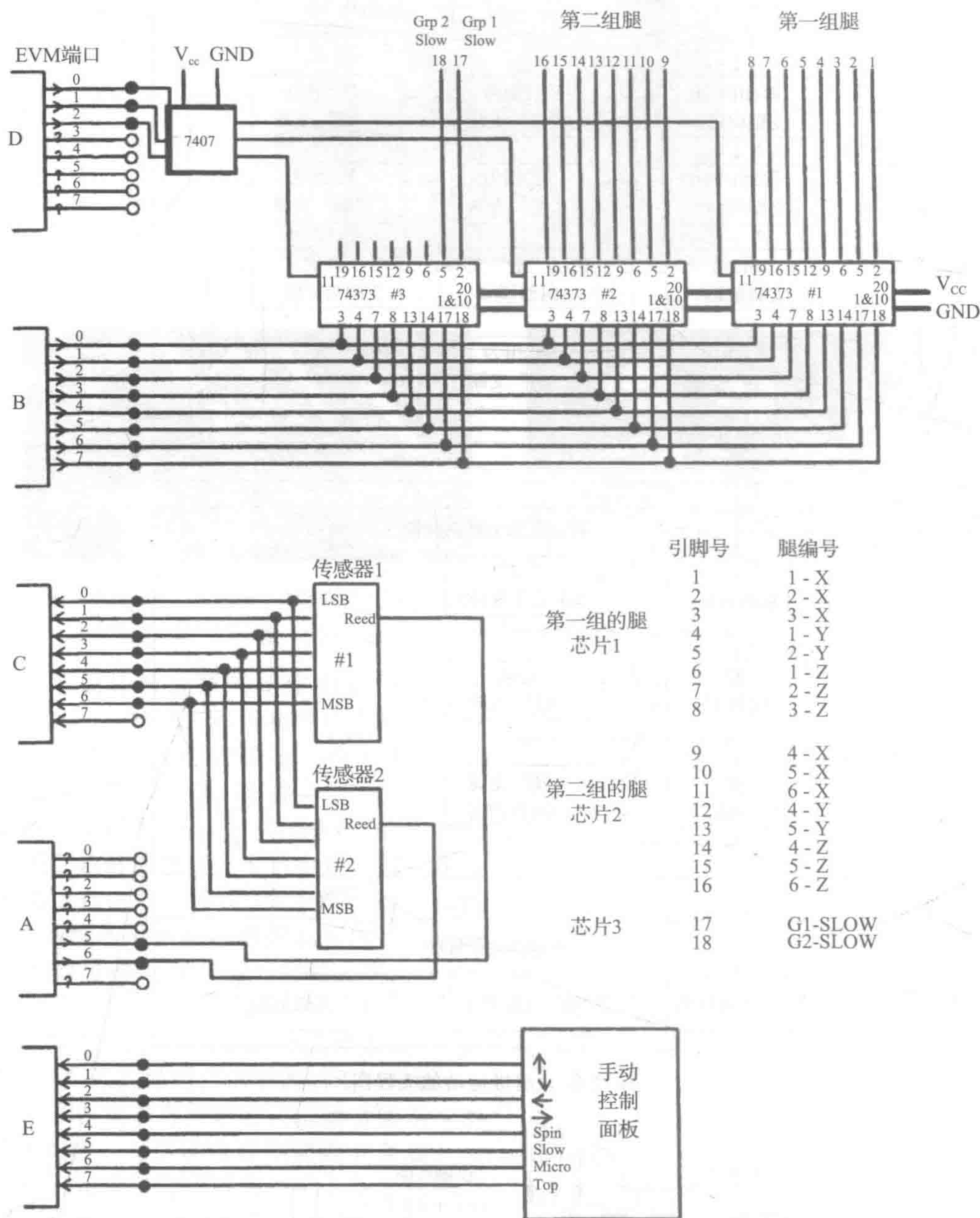


图 11-31　气动系统

控制器选择摩托罗拉的 68HC811E2 EVM 型 8 位基于微控制器的单板计算机。它包括有 128KB 的 RAM 和 64KB 的虚拟内存以便从外部 PC 或笔记本电脑上下载控制程序。30

个 I/O 位通过多路复用和扩展实现了所有机器组件所需的 48 位控制。首先在一台笔记本电脑上运用高级语言 C 以创建计算机代码，然后将其编译、传输下载到摩托罗拉 EVM 芯片中进行测试。这为测试和修改控制策略提供了一个合适的开发平台。



引脚号	腿编号
1	1-X
2	2-X
3	3-X
4	1-Y
5	2-Y
6	1-Z
7	2-Z
8	3-Z
9	4-X
10	5-X
11	6-X
12	4-Y
13	5-Y
14	4-Z
15	5-Z
16	6-Z
17	G1-SLOW
18	G2-SLOW

图 11-32 计算机端口及 I/O 板

除了各种行走运动以外，机器还使用两个光学回射型传感器来实现传感器的反馈控制。传感器安装在一个旋转平台上以扫描到机器前面的部分区域。数字编码器可以提供对应两个传感器的位置状态信息。传感器的数据通过 I/O 总线读取到微处理器中，然后软件通过数据来控制相关路线以避免障碍。

总之，我们研究了一个于 1994 年获得 SAE 步行机十项全能第一名的学生设计的机电一体化系统的例子。它展示了使用气动执行器来完成相应的运动，使用光学传感器来完成

信息反馈及使用机载微型计算机来完成机器控制和自动运行模式。这样的项目需要大量的时间才能得到完成。这个项目需要 8 个月的工作量。设计这样一个复杂机电一体化系统的经验是非常宝贵的，特别是在实际过程中建立、调试并实现设计目标。在这个项目中，学生们对于他们设计的机器能够成功地完成相应的预期动作而感到兴奋。这一设计得到了观众的好评，很多观众都最后觉得他们的设计很棒。

11.7 各种机电一体化系统的示例

本书的最后，总结一些日常生活中你可以找到的机电一体化系统。目前，绝大多数的工程系统设计都可以归类于机电一体化系统。

- 安全气囊系统、防抱死刹车系统、远程自动门锁、巡航控制、稳定和牵引力控制系统、混合动力汽车电源管理及其他汽车系统
- 数控加工设备、数控车床、快速原型系统和其他自动化生产设备
- 复印机、文档扫描仪和其他半自动化办公设备
- 医疗设备、关节镜仪器、超声波探头及其他医疗诊断设备
- 自动对焦相机、视频和 CD/DVD 播放器、便携式摄像机及其他复杂的电子消费品
- 激光打印机、硬盘驱动系统、游戏控制器和其他计算机设备
- 焊接机器人、自动导向车(AGV)、美国宇航局的火星探测器及其他机器人
- 飞行控制执行器、起落架系统、驾驶舱控制和仪表及其他飞机子系统
- 车库门开启设备、安全系统、供暖系统、通风器、空调(HVAC)控制及其他家用设备
- 洗衣机、洗碗机、自动化冰箱及其他家用电器
- 变速设备、数字力矩扳手及其他现代化工具
- 材料测试机、汽车测试假人及其他实验室支持设备
- PLC 控制的传送带系统和其他工厂自动化系统
- 手动和半自动液压起重机的控制器及其他建筑设备
- 在一个集成电路生产操作中自动贴标系统和电荷耦合器件(CCD)摄像机检查
- 视频游戏和虚拟现实的输入控制器

问题和练习

11.1 给出课堂讨论项目 11.1 全面彻底的答案。

11.2 根据之前给出的机电一体化系统，说明所需的电子装置、传感器和执行器。

11.3 根据之前给出的机电一体化系统，建议一种控制方式并给出选择的理由。

11.4 给出课堂讨论项目 11.2 全面彻底的答案。

11.5 给出一个与课堂讨论项目 11.2 所对应的 PicBasic Pro 程序来模拟时序逻辑电路的功能显示。

参考文献

Bolton, W., *Mechatronics,* 2nd ed., Addison Wesley, Harlow, Essex, England, 1999.

Ogata, K., *Modern Control Engineering,* 5th ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2009.

Palm, W., *Modeling, Analysis, and Control of Dynamic Systems,* 2nd ed., John Wiley, New York, 1999.

附录A 测量基础

阅读、讨论、研究并应用了本章的内容后，能够：

1. 定义 SI 单元并在计算中运用；
2. 了解如何利用统计学基础知识来描述测量数据的特性；
3. 能够计算测量误差

A.1 单位制

设计、分析和使用任何测量系统的基础是对量化测量的物理参数的**单位制**有一个完整的理解。为了定义一个单位制，必须依据其物理参数的定义来选择一个基本的度量单位。如质量、长度、时间、温度、电流、物质的量发光强度这样的单位就能实现上述目的。在机电一体化系统中其他用来测量物理量的单位可以依据这七个**基本单位**来定义。

课堂讨论项目 A.1　基本单位的定义

虽然每个人都对与基本单位相关的物理量有直觉的认识，但用日常语言是很难定义它们的。尝试去定义长度。你可能会在长度的定义过程中使用一些同义词。尝试定义别的单位，用简单术语进行定义同样都是困难的。

常用的七个基本单位为：质量、长度、时间、温度、电流、物质的量和发光强度，它们的单位是千克、米、秒、开尔文、安培、摩尔和坎德拉。这些单位形成了国际单位制的基础，缩写为 SI，起源于法国勒国际单位。

千克是唯一一个根据材料标准定义的单位。它是由在巴黎 Bureau des poidset 实验室内的铂-铱原型建立的。不幸的是，千克这个名字是令人迷惑的，因为它包含前缀“千”，这与在 A.1.1 节中所描述的 SI 部分是有冲突的。

米定义为氪 86 原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1 650 763.73 倍。米的原子标准由麦克斯韦(1873 年)提出了很久，但直到 1960 年才得到应用。前面的定义，如在铂-铱原子两条刻线之间的距离，就像千克一样需要定义一个原型。现在实际的测量单位是与定义有区别的，定义独立于一个独特的原型。米的另一种标准是在 1983 年定义的：光在真空中于 1/299 792 458s 内行进的距离。

秒的定义为铯 133 原子基态的两个超精细能阶间跃迁辐射振荡 9 192 631 770 个周期的持续时间。秒以前的定义基于太阳能量的均值，即定义为地球每天自转的一个分数(1/86 400)。地球每年的自转将会产生总计 1 或 2s 的精度误差。

绝对的热力学温度的单位是**开尔文**。开氏温标的绝对零度为 0K，而且不存在低于这一水平的任何温度。有一种误解是所有的分子在这个值上停止运动。实际上分子能量是很低的。标准的固定温度校准点是水的三相点，为了与摄氏温标保持一致，所以，它设定在一个值为 273.16K 处。虽然只使用绝对零度和三相点就建立了开氏温标，其他不动点是基于其他材料的沸腾和熔点来定义完成的。这些点对于校准温度测量设备是有用的。开尔文温度与**摄氏度**之间的关系可以表示为以下方程：

$$T_C = T_K - 273.15 \tag{A-1}$$

其中，T_K 为开尔文温度；T_C 为摄氏温度，表示为℃。水的三相点是 0.01℃，对应于

273.16K。摄氏温标有时称为**摄氏度**，因为它是水的冰点℃和水的沸点(100℃)之间100℃的温度校准间隔。一个区间或不同的温度差(ΔT)在摄氏和开尔文尺度($\Delta T_C=\Delta T_K$)下具有相同的值。

安培定义为：在真空中，截面积可忽略的两根相距1m的平行而无限长的圆直导线内，通以等量恒定电流，导线间相互作用力在1m长度上为2×10^{-7}N时，则每根导线中的电流为1安培，又称绝对安培。然而，这也引发了一个测量难题，因为这个定义是基于其他基本单位实现的。因此，任何其他基本单位的误差将会累积为安培的复合测量误差。

摩尔定义为0.012kg(12克)^{12}C(碳12)所包含的原子个数。

坎德拉定义为发光强度的单位，是指在垂直方向上表面积为1/600 000m^{2}的黑体在铂的冰点压力101 325N/m^{2}下的强度。

A.1.1 三类SI单位

国际标准单位分为三类：基础单位、导出单位和辅助单位。全套的SI**基本单位**和符号如表A-1所示。

表A-1 SI基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
发光强度	坎德拉	cd

导出单位表示为基础单位的代数组合。任何已知的物理参数都可以使用导出单位来量化。表A-2所示为一些导出单位。一些导出单位有特殊的名称和符号，这可能是根据基础单位来表达其他派生单位的一个简单方法。表A-3所示为一些**辅助单位**。

表A-2 根据基础单位得到的SI导出单位

量的名称	单位名称	单位符号
面积	平方米	m^2
体积	立方米	m^3
速度	米每秒	m/s
加速度	米每平方秒	m/s^2
密度	千克每立方米	kg/m^3
电流密度	安培每平方米	A/m^2

表A-3 具有特殊名称的SI导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	表达式
频率	赫兹	Hz	1/s
力	牛顿	N	kg·m/s^2
压力、应力	帕斯卡	Pa	N/m^2=kg/m·s^2
能量、功	焦耳	J	N·m=kg·m^2/s^2
功率、辐射通量	瓦特	W	J/s=kg·m^2/s^3
电荷	库仑	C	A·s
电压、电势	伏特	V	W/A=kg·m^2/A·s^3

（续）

量的名称	单位名称	单位符号	表达式
电容	法拉	F	$C/V=s^4A^2/m^2kg$
电阻	欧姆	Ω	$V/A=m^2kg/s^3A^2$
电导	西门子或姆欧	S 或 Ω	$1/\Omega=s^3A^2/m^2kg$
磁场	特斯拉	T	$N/A\cdot m=kg/s^2A$
磁通	韦伯	Wb	$T\cdot m^2=m^2kg/s^2A$
电感	亨利	H	$V\cdot s/A=m^2kg/s^2A^2$

通常基础单位、导出单位和辅助单位常常加以修改来方便表示大数值范围的参数。**前缀**表达单位的数量级(10 的倍数)，提供了一个替代科学记数法。前缀的名称、符号和值如表 A-4 所示。

表 A-4 单位前缀

名称	符号	数量
尧它	Y	10^{24}
泽它	Z	10^{21}
艾可萨	E	10^{18}
拍它	P	10^{15}
太拉	T	10^{12}
吉咖	G	10^{9}
兆	M	10^{6}
千	k	10^{3}
百	h	10^{2}
十	da	10
分	d	10^{-1}
厘	c	10^{-2}
毫	m	10^{-3}
微	μ	10^{-6}
纳诺	n	10^{-9}
皮可	p	10^{-12}
飞母托	f	10^{-15}
阿托	a	10^{-18}
仄普托	z	10^{-21}
幺科托	y	10^{-24}

例 A.1 单位的前缀

1.25 亿瓦发电厂的输出可以表示为：

125 000 000W 或 125MW

高性能电子产品中微小的时间间隔可以表示为：

5.27×10^{-13}s 或 0.527ps

课堂讨论项目 A.2　　SI 前缀的常用法

根据表 A-4 中列出的前缀，思考或研究一个可测物理量通过前缀来表达值的常用例子。

A.1.2 转换因子

在美国，**英制单位**在工程实践领域仍普遍使用。表 A-5 列出了英制单位和 SI 单位之间的转换因子。

表 A-5　英制单位和 SI 单位之间的转换因子

物理量	英制单位	SI 单位
长度	1in	2.540cm
	1ft	0.3048m
	1mi(mile)	1.609km
质量	1lbm(pound mass)	0.4536kg
力	1lbf(pound force)	4.448N
温度	Fahrenheit temperature(T_F)	$T_k=5/9\cdot(T_F-32)+273.15$
压力	$1lb/in^2$(psi)	6.895×10^3Pa
	1atm	1.013×10^5Pa
功率	1Btu/h	0.2929W
	1hp	745.7W
磁场	1gauss	1.000×10^{-4}tesla

课堂讨论项目 A.3　　SI 单位的物理意义

为了了解国际标准单位的物理意义，考虑并记住每个单位的具体案例是十分有用的。对于下列常见的物理量，列出了合适的 SI 单位和近似值：

- 一个典型的人类脚的长度
- 一个城市街区的长度
- 两瓶 2L 汽水的质量
- 一般成年人的质量
- 拿起一瓶 2L 汽水所需要的力
- 由一般成年人身体所施加的力
- 人体温度
- 舒适的房间温度
- 大气压力
- 典型建筑气动系统中的空气压力
- 典型白炽灯泡的耗散功率
- 典型汽车所产生的最大功率

A.2 有效数字

当处理数值数据时，必须要有精确性、精度及利用不同方法表示数据的意识。同时，在根据测量值建立一个合理的数值计算方法时，必须对小数部分取适当的位数进行

表示。

有效的数或数值的**有效数字**是确定的。一个 N 位测量值由 $N-1$ 位有效数字和 1 位估计值组成。例如，当阅读压力计上的刻度盘时，会记录 4.85Pa。这里 4 和 8 是确定的，但 5 就有可能是一个内插值。因此，一个观察者就要进行有意义的评估。如果数字的第一位为零，则前导位为零并不重要，因为它们只是用来修复小数位的(见例 A.2)。

目前，当使用数字计算机进行数据处理时，必须意识到一个 12 位数的计算结果可能只有 3 位有效数字！其余的可能毫无意义。

例 A.2 有效数字

注意有效数字的个数和下列数据所对应的有效数字：

数据	有效数字的个数	有效数据的内容
50.1	3	5、0、1
0.0501	3	5、0、1
5.010	4	5、0、1、0

例 A.3 科学计数法

科学记数法对于清楚地表示有效数字的个数是很有用的。下面为例 A.2 的数字位数：

科学计数法表示的数据	有效数字的个数
5.01×10^{1}	3
5.01×10^{-2}	3
5.010×10^{0}	4

当数值含有不同数量的有效数字时，其数学计算过程往往是非常困难的。必须谨慎地进行四舍五入，并保留适当有效数字的计算结果。

当你需要处理一个含有 N 位有效数字的数据时，舍掉第 N 位右边的所有数字。如果丢弃的数值超过第 N 位数字部分的一半，则第 N 个数字增加 1。如果不到第 N 位数字的一半，则不用修改。如果它是第 N 位数字的一半，一个常见的处理办法是如果它是偶数则 N 位数字保持不变，如果它是奇数增加 1。当你应用这些规则时，保持数字的一致是很重要的。

当添加数字时，以最少的准确数字确定小数点右边的有效数字的数量。然后，通过截断在剩下的数字中仅保留一个小数点。现在添加数字和舍入到相同的小数位数作为最准确的数字。这个过程如例 A.4 所示。

例 A.4 加法运算和有效数字

想要添加以下数字：

$$\begin{array}{l} 5.0365 \\ +1.04 \\ +6.09314 \end{array}$$

由于小数点右边的最少最精确的有效数字(1.04)有 2 位，截断其他的三位小数，进行

加法运算：

5.036
+1.04
+6.093

加法运算后的结果是：

12.169

由于小数点右边的有效数字是两位，去除多余的两位数字，得到：

12.17

对两个参数量进行减法运算时，对小数点后的数字进行取舍以使其成为更精确的数字。如例A.5所示，它给出了减法运算是如何提供最小有效数字的。

例A.5 减法运算和有效数字

想要对以下数字进行减法运算：

8.59320
−1.04

由于小数点后有两位最小精确数字(1.04)，去除其他数字：

8.59
−1.04

减法后的结果是：

7.55

当进行乘法和除法运算时，将最精确的数四舍五入，使其比最不精确的数多一位有效数字，将结果四舍五入至与最不精确的数有相同的有效数字不是最低有效数字。例A.6给出了计算相同有效数字下的结果。

例A.6 乘法和除法运算和有效数字

乘法与除法问题如下：

(1.03)(51.7946)(3.01)(695.01)(7001.59)

使最精确的数四舍五入至4位有效数字(比具有3位有效数字的1.03和3.01多1位)：

(1.03)(51.79)(3.01)(695.0)(7002)

保留3位有效数字后的乘法运算结果是：

$$0.000\,033\,0 = 3.30 \times 10^{-5}$$

A.3 数据统计

当对实验测量获得的数据集进行处理时，必须理性、系统和有组织地对数据进行处理。**统计**领域为解决上述问题提供了相应的模型和规则。

通常，寻求一组数字或一个数字来表示或描述一个大型的数据集。第一步是通过数据的最小值和最大值(通常称为**极值**)来评估数据的范围。然后，观察这些数据在极值点之间是如何分布的。使用**直方图**分布可以以图形的方式对数据进行表示，结果将数据值排序成组并在每个组中显示数据点的数量。表A-6中给出的实验数据组的直方图如图A-1所示。

表 A-6　实验数据集

标号	数值	标号	数值
1	25.5	7	55.3
2	42.1	8	29.1
3	36.4	9	32.1
4	32.1	10	34.0
5	15.6	11	35.0
6	38.6		

落入直方图数据组的数据点数量称为**频率**。如图 A-2 所示，直方图可以近似为一个特定的形状，如正态、偏态、双峰或均匀分布。正态分布是以平均值为基础的经典数据统计方法。偏态分布表示统计学上数据偏向均值一侧的程度。双峰分布代表的情况可能是具有两个不同中值的数据组进行合并。均匀分布表示数据完全是随机分布的。

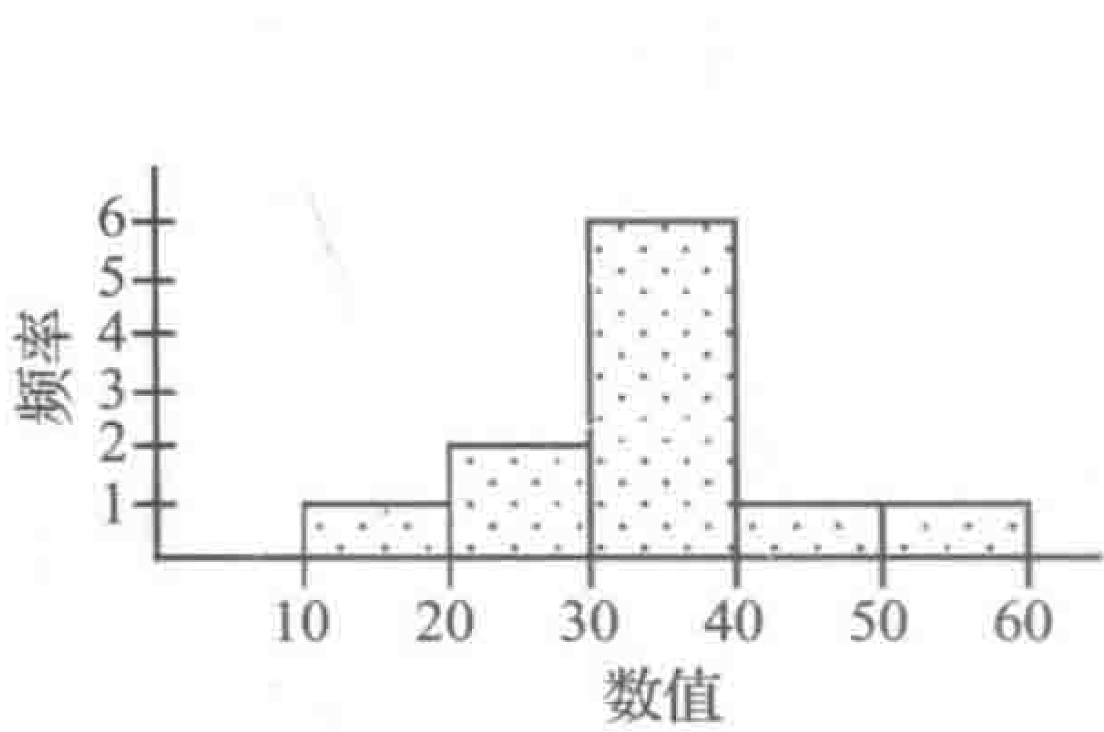


图 A-1　实验数据直方图

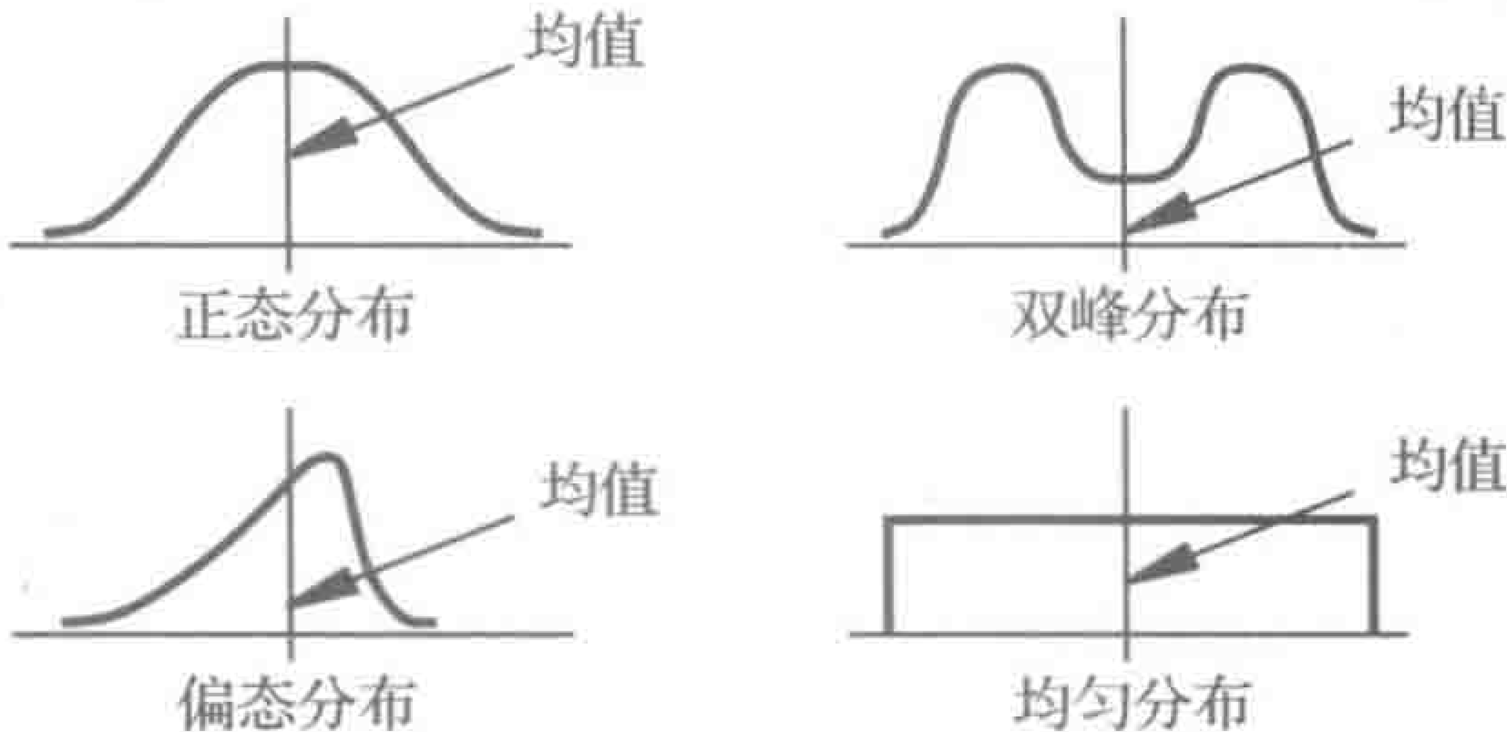


图 A-2　数据分布

创建直方图需要许多数据点。统计学提供了一种从直方图中能够提取表示数据集特征的少数几个数据的规则。**算术平均**是最重要的统计度量方法，也称**平均**或简称为均值，可以通过将数据 x_i 的总和除以数据点个数 N 来得到：

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1} x_i}{N} \tag{A-2}$$

其他描述一组数据的统计措施是**中位数**，这是指该数据点两边具有同等数量的数据点；**众数**是一组数据中出现次数最多的数值；**几何平均数**是数据乘积的 N 次方根值：

$$\mathrm{GM} = \sqrt[N]{x_1 x_2 \cdots x_N} \tag{A-3}$$

因为几何平均数的倒数等于算术平均数的倒数，所以对于平均比率来说，几何平均数比算术平均数更可信。

对于表 A-6 中的数据集来说，均值为 34.2，中位数为 34.0，众数是 32.1，几何平均数是 32.7。

课堂讨论项目 A.4　统计计算

验证表 A-6 所示的数据的均值、中位数、众数和几何平均数。

课堂讨论项目 A.5　你们班级年龄的直方图

在你的班级中，根据每个人的出生日期绘制一张年龄的变化图，从最年轻的开始。并根据出生年绘制一个出生年年龄的直方图。在本章的最后保存问题 A.2 的直方图数据。

在一定范围内数据集的扩展或分散特征可以用另一个统计度量来表示，称为**方差**，它定义为：

$$v=\sigma^2=\sum_{i=1}^{N}\frac{(x_i-\overline{x})^2}{N-1} \tag{A-4}$$

其中，x_i 为独立的测量量；N 是测量数据的总数，也称为试验的**样本容量**。**标准差** σ 也可以用该分布来描述，但测量单位不同。它定义为方差的平方根：

$$\sigma=\sqrt{v}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{(x_i-\overline{x})^2}{N-1}} \tag{A-5}$$

利用标准差的大小能够估计试验数据在平均值附近的分布。一个小的标准差表示数据集有一个狭窄的分布区间。

课堂讨论项目 A.6　　标准差和样本容量之间的关系

式(A-5)中的分母是难以确定的，因为人们认为可以将它假设为 N，可以提供**有效值**。为什么分母是$(N-1)$而不是 N？考虑只有一个样本时的情况$(N=1)$。同时，考虑在已知数据集均值的情况下，必须指定多少个数据值 x_i。

A.4　误差分析

测量过程往往是不完美的，测量值总会存在不确定性。重要的是辨别误差来源并在测量过程中估计误差的大小。通常制造商在发布的规范中已经定义了设备的精度，但影响其精度的因素很多。

通常，有 3 种类型的误差：系统误差、随机误差和粗大误差。**系统误差**是在相同方式的输入条件下每一次测量会重复出现的误差。**校准**是减小系统误差的常见方法，测量仪能够根据标准输入值来记录数值，并通过调整来补偿误差。**随机误差**是由于测量过程中发生随机变化而引起的。在前一节中提出的一些统计工具能够帮助尽可能地减少这些误差的影响。**粗大误差**发生在当工程师或科学家犯错误的时候。粗大误差可以通过精心设计和审查或通过使用系统程序加以避免。

图 A-3 所示为系统误差和随机误差。目标的中心代表了期望值，点代表了测量数据。系统误差又称为不精确性，与转移拍摄模式的中心目标相关，可以纠正瞄准来加以改善，而这一过程称为校准。随机误差，称为不严密，是点模式的大小，但不能通过调整瞄准模式来加以改善。准确性是接近真实值的，而精度则体现了测量的重复性和一致性。

在存在随机误差的情况下统计计算帮助更精确地估计样本的测量值。平均值，或者中值为估计提供了可能。

误差预测方法

当需要设计一个测量过程来根据已定义的变量计算参数时，需要根据变量的组合误差来估计参数的误差。计算这个整体误差的程序如下：

1. 准备数据表，包括每个变量的正负误差估计。一般来说，估计误差不能超过 2 位有效数字。

2. 如果参数的计算结果是 X，其中 X 是关于测量变量(v_i)的函数，

$$X=X(v_1,v_2,\cdots,v_n) \tag{A-6}$$

计算偏导 $\partial X/\partial v_1$，$\partial X/\partial v_2$，…，$\partial X/\partial v_n$，并根据记录数据来评价每个数的三位有效数字$(v_1,\ v_2,\ \cdots,\ v_n)$。

3. 计算整体的绝对误差 E

$$E=\Delta X=\left|\frac{\partial X}{\partial v_1}\Delta v_1\right|+\left|\frac{\partial X}{\partial v_2}\Delta v_2\right|+\cdots+\left|\frac{\partial X}{\partial v_n}\Delta v_n\right| \tag{A-7}$$

其中，Δv_i 是记录值 v_i 的误差，E 取两位有效数字。

更常见的误差度量是**有效值**误差，它是每个误差项平方和的平方根：

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial v_1}\Delta v_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial v_2}\Delta v_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial X}{\partial v_n}\Delta v_n\right)^2} \tag{A-8}$$

有效值误差是近似于实际误差的。

4. 通过式(A-6)来计算 X，而不是 E。例如，如果 $E=\pm 0.039$，则 X 的计算结果为 8.9234，那么这个值四舍五入后的结果是 $E=8.923$。当计算 X 时，将 v_1，v_2，…，v_n 看作为精确的数字。

5. 结果是

$$X = 8.923 \pm 0.039$$

下面是对数字进行处理和分析实验数据计算误差过程的总结：

1. 注意特殊仪器能够显示的有效数字。
2. 记录所有具有正确有效数字的参数值。如果仪表显示不提供数字输出，那么可能要求观察者估计测量的准确性。
3. 系统中的不同仪器可能会有不同的有效数字。
4. 当使用方程对结果进行计算时，在计算过程中应保留适当数量的有效数字。
5. 如果事件可以重复，可以通过平均方法获得更好的估算值。这些样本的标准差给出了精度的一种度量方法。

问题和练习

A. 1　运用更合适的 SI 前缀来表达以下的量值：

a. 100 000 000kg

b. 0.000 000 025m

C. 16.9×10^{-10}s

A. 2　为课堂讨论项目 A. 5 中的数据绘制相应的直方图，并计算其所对应的均值、标准差、中位数、众数和几何平均数。

A. 3　矩形悬臂梁在(12 520±10)N 的载荷作用下，计算出的最大应力的总体绝对误差和有效值误差是多少？梁的几何度量尺寸精确到 0.5mm，其长度为 0.95m，宽为 11.8cm，高为 12.1cm。最大应力发生在梁表面的墙上

$$\sigma_{\max} = \frac{MC}{I}$$

其中，M 为弯矩，可表示为力和梁长度的乘积；c 为到中性轴距离的一半高度；I 是梁截面的惯性矩。

$$I = \frac{1}{12}wh^3$$

其中，w 和 h 分别为梁截面所对应的宽度和高度。

参考文献

Beckwith, T., Marangoni, R., and Lienhard, J., *Mechanical Measurements,* Addison-Wesley, Reading, MA, 1993.

Chapra, S. and Canale, R., *Introduction to Computing for Engineers,* McGraw-Hill, New York, 1994.

Chatfield, C., *Statistics for Technology,* Penguin Books, Middlesex, England, 1970.

Doeblin, E., *Measurement Systems Applications and Design,* 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 1990.

附录B

物理原理

当你阅读、讨论、研究并应用了本章的内容后，能够：

1. 明确各物理量之间可能的关系
2. 确定几乎所有物理量的测量方法

传感器和变送器设计总是涉及一些定律的应用或者是物理或化学原理，它们将感兴趣的变量与可测量量联系在一起。以下总结了在许多传感器和变送器设计中可能用到的物理定律和原理。同时也给出了一些示例应用。这对于正在寻找测量物理量方法的设计者来说是非常有用的。几乎每个变送器在操作过程中都会用到一个或多个这些原理。下面重点介绍与原理相关的参数。

- 安培定律：对一个封闭回路的**磁场**进行积分与流过回路的**电流**成正比。

磁性传感器可以使用这种效应作为测量导体电流的一种非侵入式方法。

- 阿基米德原理：施加于水下或浮动对象的**浮力**等于排开液体的重量。流失的**体积**取决于流体的**密度**。

一个球浸没液体比重计使用这个效应来测量流体的密度(如汽车冷却剂)。

- 伯努利方程：流体能量守恒可以用来预测流体的**压力**和**速度**之间的关系。

皮托管使用这种效应来测量飞机的速度。视频演示 B.1 显示了一个如何根据读取的流速来确定压力的示例。

- 毕奥-萨伐尔定律：某一点**电流**对**磁场**的作用取决于当前电流的大小和电流的方向。
- 毕奥定律：通过介质的**热传导**率直接与介质的**温度**差成正比。

这一原则是确定温度传感器时间常数的基础。

- 布拉格德龙定律：随着液体中杂质浓度的升高，液体的冻结**温度**下降而沸腾温度上升。
- 波义耳定律：理想气体在恒定**温度**下能够保持一个恒定的**压力**-**容积**关系。
- 布拉格定律：一束由晶体晶格衍射的X射线强度与晶体晶格的平面分离及光束的**波长**有关。X射线衍射系统使用这种效应来测量晶体的晶格几何尺寸。
- 布鲁斯特定律：材料的**折射率**与**偏振光**的反射或传输角度有关。

激光管上的布鲁斯特窗可以提取一些激光束，激光在测量系统中得到了广泛应用。

- 蝴蝶效应：混沌非线性系统对初始条件表现出敏感的依赖性。
- 离心力：物体沿着弯曲的道路运动时所受到的向外的力，它与曲率半径的方后一致。
- 查尔斯定律：理想气体的**压力**与**温度**的乘积与恒定**体积**有关。
- 克里斯琴森效应：悬浮在液体中的粉末(即胶体溶液)将会改变液体的**折射**属性。
- 苛宾诺效应：导电感应磁盘在磁场中的旋转将会产生电流。
- 科里奥利效应：一个相对于旋转参照系运动的物体(如地球)将会受到一个相对于框架的力(参见网络链接 B.1)。

科里奥利流量计使用这种效应来测量在旋转振动的U形管中的流量。

- 库仑定律：电荷间产生的相互作用力。
- 克里-维斯定律：转移**温度**时铁磁材料表现出**顺磁**行为。
- 达朗贝尔原理：**质量**块的**加速度**等效为一个大小相等、方向相反的作用力。

- 德拜频率效应：电解质的**电导**(即**阻力**减少)随着**频率**的增加而增加。
- 多普勒效应：波源的**频率**(如声音或光线)取决于其速度。

激光多普勒测速仪(LDV)使用在液体中粒子悬浮的频移反射的激光来测量流体的速度。

- 爱迪生效应：当金属在真空中加热时，它释放带电粒子的(即**热电子发射**)速度取决于**温度**。

真空管放大器是基于这种效应实现的，电子能够通过发射和控制来产生电流放大的效果。

- 法拉第电解定律：**离子沉积**或**损耗**的速率与电解**电流**成正比。
- 法拉第感应定律：一个线圈抗拒**磁场**改变的能力与**电动势**有关。

一个线性可变差动变压器二次线圈的感应电压(线性)就是这个效应的效果。

- 高斯效应：导体的**电阻**随**磁化**程度的加深而增加。
- 格拉德斯东-戴尔定律：一种物质的**折射率**是依赖于其**密度**的。
- 陀螺效应：一个物体绕一个轴旋转将会抵抗围绕其他轴的旋转(见网络链接 B. 2)。

导航陀螺仪使用这种效应来跟踪物体的运动方向，它借助于方向轮在空间中保持恒定的方向。

- 霍尔效应：在**磁场**中与**电流**的垂直方向上将会产生一个**电压**。

一个霍尔效应接近传感器可以用于检测当金属物体存在时，磁场的变化。

- 赫兹效应：**紫外线**将会影响电火花的放电间隔。
- 胡克定律：当单向加载轴向**应力**时，轴向**应变**与线性弹性材料直接成正比。

电阻测量的应变计读数可以转化成压变读数，其直接与作用于受载物体的压力有关。

- 约翰逊-拉哈贝克效应：在导体、半导体或绝缘体之间的界面**摩擦**随接触间的电压增长而增长。
- 焦耳定律：**电流**通过**电阻**将会产生**热量**。

热线风速仪的设计是基于这一定律完成的。

- 克尔效应：对某一种物质施加**电压**会导致**光学极化效应**。

液晶显示器(LCD)的运行就是基于这一效应的。

- 科耳劳希定律：一种**电解**物质的电导是有限的(最小**阻力**)。
- 朗伯余弦定律：物体表面的反射**亮度**随**入射角度**余弦值的变化而变化。
- 楞次定律：感应**电流**的方向与电流所产生的**磁场**变化方向是相反的。
- 洛伦兹力定律：**磁场**中的带电导体将会受到力的作用。

根据这个定律，电流计通过在一个永久磁场中线圈轴的偏转量来测量电流。

- 磁致伸缩效应：当**铁磁**材料暴露于磁场中时是会发生**收缩**的。

这种效应被磁阻式线性位移传感器所使用(见视频演示 B. 2)。

- 玛格内托效应：在磁场中，磁流变阻尼器中流体的**黏度**会显著增加。
- 马格纳斯效应：当流体流过一个旋转物体时，物体会受到一个垂直于流体方向的**力**。
- 迈斯纳效应：**磁场**中的**超导**材料会在这区域中结块并且无内部场。
- 摩尔定律：在集成电路中可制造的晶体管密度每隔 18 个月可以翻一番。
- 墨菲定律：在错误的时间和错误的地方将会出现任何错误。

实验室内的实验将会验证这个定律。

- 能斯特效应：**磁场**中的**热流**会产生一个**电压**。
- 牛顿定律：物体的**加速度**与物体所受到的力成正比。
- 欧姆定律：流过**电阻**上的**电流**与**电压**降成正比。
- 帕金森定律：人的整个工作扩大到分配给他的时间。
- 珀尔帖效应：当**电流**流经两种金属间的结点时，**热量**将会被吸收或释放。

热电偶的测量就是部分基于这一效应来实现的。

- 光电导效应：当光照射到某些半导体材料时，材料的**电阻**会下降。

一个广泛用于光电探测器中的光敏二极管就是基于这种效应实现的。

- 光电效应：当**光**照射到金属阴极时，会发射电子并吸引阳极，从而导致**电流**的产生。

光电倍增管的操作就是基于这种效应实现的。

- 光感效应：当**光**照射到半导体的接触金属底座时会产生一个**电压**。

太阳能电池就是基于这个效应实现的。

- 压电效应：当晶体收缩时，**电荷**会流失。

压电加速度计根据质量的惯性可以测量压电晶体受到应变后的电荷极化。

压电式扬声器中利用声压波转换为电压信号的能力就是基于这一效应实现的。

- 压阻效应：**电阻**与外加**应力**成正比。

应变计的部分响应就是由这种效应引起的。

- 收缩效应：液态导体的横截面随着**电流**的增大而减小。
- 泊松效应：材料变形发生在与作用**应力**垂直的方向上。

这种效应是造成应变计响应的部分原因。

- 热电效应：当**温度**变化时，**晶体**发生极化。
- 罗利标准：流体的加速度与气泡的形成有关。
- 拉乌尔效应：当导体的电阻变化时，它的长度也会变化。

这种效应是造成应变计响应的部分原因。

- 塞贝克效应：不同金属接触导致的结**电压**变化依赖于**温度**。

这是解释了热电偶功能的主要效应。

- 形状记忆效应：一个变形的金属在加热后会回到原来的形状(见视频演示 B.3)。
- 斯涅尔定律：**光线**的反射和折射与入射角相关。
- 斯塔克效应：电磁源分裂的**谱线**比**电场**要多。
- 斯蒂芬-玻耳兹曼定律：从黑体辐射的**热量**正比于**温度**的四次方。

高温计的设计就是基于这一定律实现的。

- 斯托克斯定律：荧光材料的光**波长**总是超过吸收光子的。
- 提伯电流效应：两种不同金属之间的相对运动和**摩擦**会在接触间产生一个**电压**。
- 魏德曼-珐琅法律：温度与材料电导率的比值与绝对温度成正比。
- 文氏效应：随着施加电压的增加，电解质**电导**也会增加(即电阻降低)。
- 维恩位移定律：当白炽材料的**温度**增加时，反射**光**的光谱会变为蓝色。

附录 C

材料力学

当你阅读、讨论、研究并应用了本章的内容后，能够：

1. 了解应力和应变之间的基本关系
2. 能够确定在一般平面应力状态下主应力值和方向
3. 能够构建莫尔圆平面应力状态

应力与应变关系

如图 C-1 所示，当一个圆柱形杆件受到轴向载荷时，它会伸长 ΔL，径向变形为 ΔD。**轴向应变**($\varepsilon_{\text{axial}}$)定义为单位长度上的变化量：

$$\varepsilon_{\text{axial}} = \frac{\Delta L}{L} \tag{C-1}$$

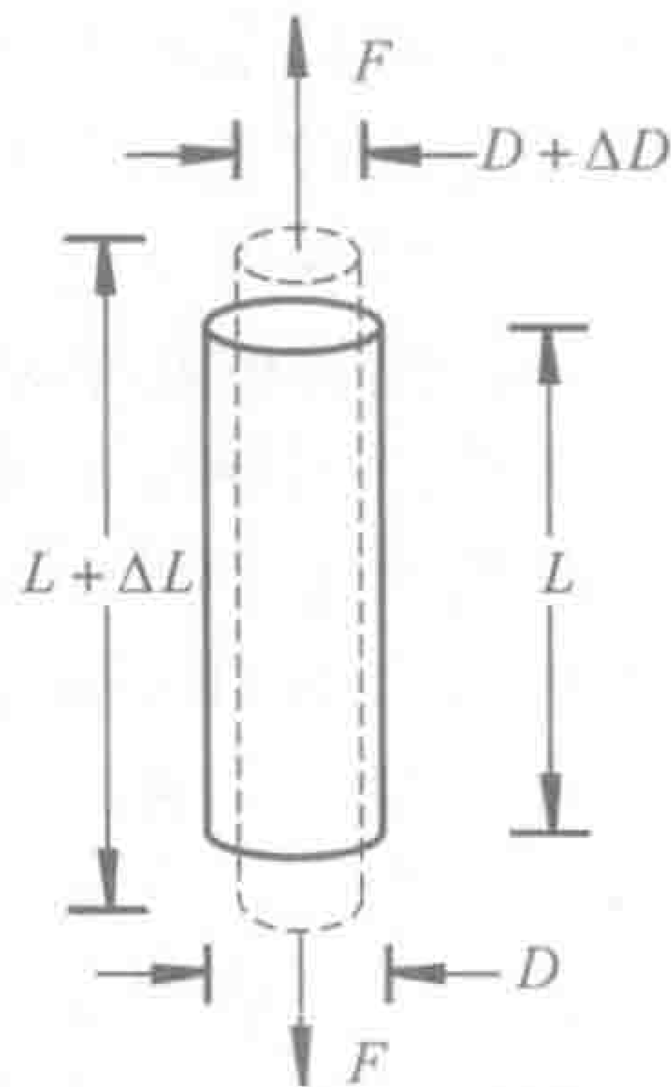


图 C-1 圆柱杆的轴向和横向变形

值得注意的是，应变是一个无量纲参数。**轴向应力**(σ_{axial})与轴向应变之间服从**胡克定律**。单向加载时，线性弹性材料的轴向应力与轴向应变成正比：

$$\sigma_{\text{axial}} = E\varepsilon_{\text{axial}} \tag{C-2}$$

其中，E 为**弹性模量**的比例常数，即**杨氏模量**。杆的轴向应力可以表示为：

$$\sigma_{\text{axial}} = F/A \tag{C-3}$$

其中，F 为轴向力；A 为杆的横截面积。因此，轴向应变与轴向应力及载荷有关：

$$\varepsilon_{\text{axial}} = \frac{\sigma_{\text{axial}}}{E} = \frac{F/A}{E} \tag{C-4}$$

横向应变定义为宽度的变化量除以原始宽度：

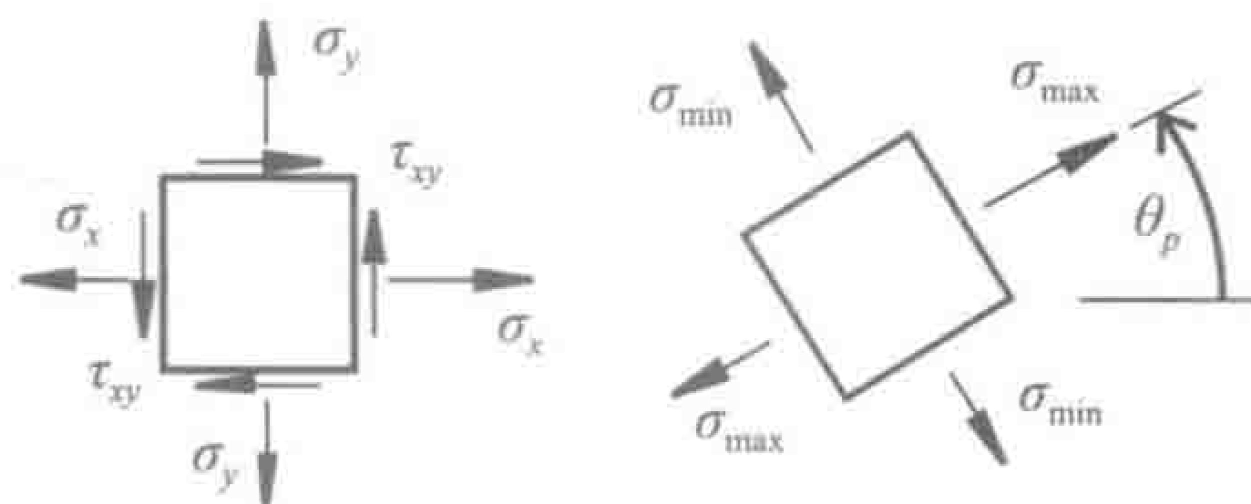
$$\varepsilon_{\text{transverse}} = \frac{\Delta D}{D} \tag{C-5}$$

横向应变和轴向应变的比值定义为**泊松比**(ν)：

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{transverse}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} \tag{C-6}$$

值得注意的是，对于轴向伸长($\varepsilon_{\text{axial}} > 0$)和 $\varepsilon_{\text{transverse}}$[根据式(C-6)]，可知 ΔD[根据式(C-5)]为负。这意味着横向径向收缩。对于大多数金属来说，泊松比大约是 0.3，这意味着有 −30%的轴向应变。

在一定程度上，如图 C-2a 所示，一般的平面应力状态作用于无穷小的方形元素上。它包括两个标准的应力组件(σ_x、σ_y)和剪切应力组件(τ_{xy})，其值取决于元素的方向。对于任何点，总有一个元素的方向，使其具有最大标准应力和零剪切应力($\tau_{xy}=0$)。对应这个方向的两个正交的法向应力的方向称为**主轴**，正常情况下的压力称为**主应力**($\sigma_{\max}$和 $\sigma_{\min}$)。图 C-2b 说明了这个方向和相应的应力状态。主应力的大小和方向



a) 一般状态下的应力　　a) 主应力

图 C-2 一般的平面应力状态与主应力

与其他方向的应力有关

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \tag{C-7}$$

$$\sigma_{\min} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \tag{C-8}$$

$$\tan(2\theta_{\mathrm{p}}) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \tag{C-9}$$

式中，θ_{p} 为 σ_x 与 $\sigma_{\max}$间的角度，它是沿逆时针方向测量的。

主应力是确定材料在载荷作用下屈服或失效的主要因素，因为可以通过计算得到最大应力，并将其与材料的屈服强度进行比较。最大剪切应力也是预测失效的重要指标，可以表示为：

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{C-10}$$

根据式(C-7)与式(C-8)，参数间的关系可以表示为：

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\mathrm{avg}} + \tau_{\max} \tag{C-11}$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_{\mathrm{avg}} - \tau_{\max} \tag{C-12}$$

其中

$$\sigma_{\mathrm{avg}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \tag{C-13}$$

引起切向力的元素方向可以表示为

$$\tan(2\theta_{\mathrm{s}}) = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \tag{C-14}$$

其中，θ_{p} 与 θ_{s} 是从 σ_x 的方向开始逆时针测量得到的。对图 C-1 所示的圆柱杆来说，在轴向方向(y)上因为元素方向与主应力方向一致，所以 $\sigma_{\max}=\sigma_y=F/A$，$\sigma_x=0$ 且 $\sigma_{\mathrm{p}}=0$。同时，$\theta_{\mathrm{s}}=45°$，$\tau_{\max}=\frac{\sigma_y}{2}=\frac{F}{2A}$。

应力状态及其与主应力的大小和方向的关系通常可以用**莫尔圆**来加以表示，它显示了在不同方向上剪切应力和正常应力之间的关系(参见图 C-3)。

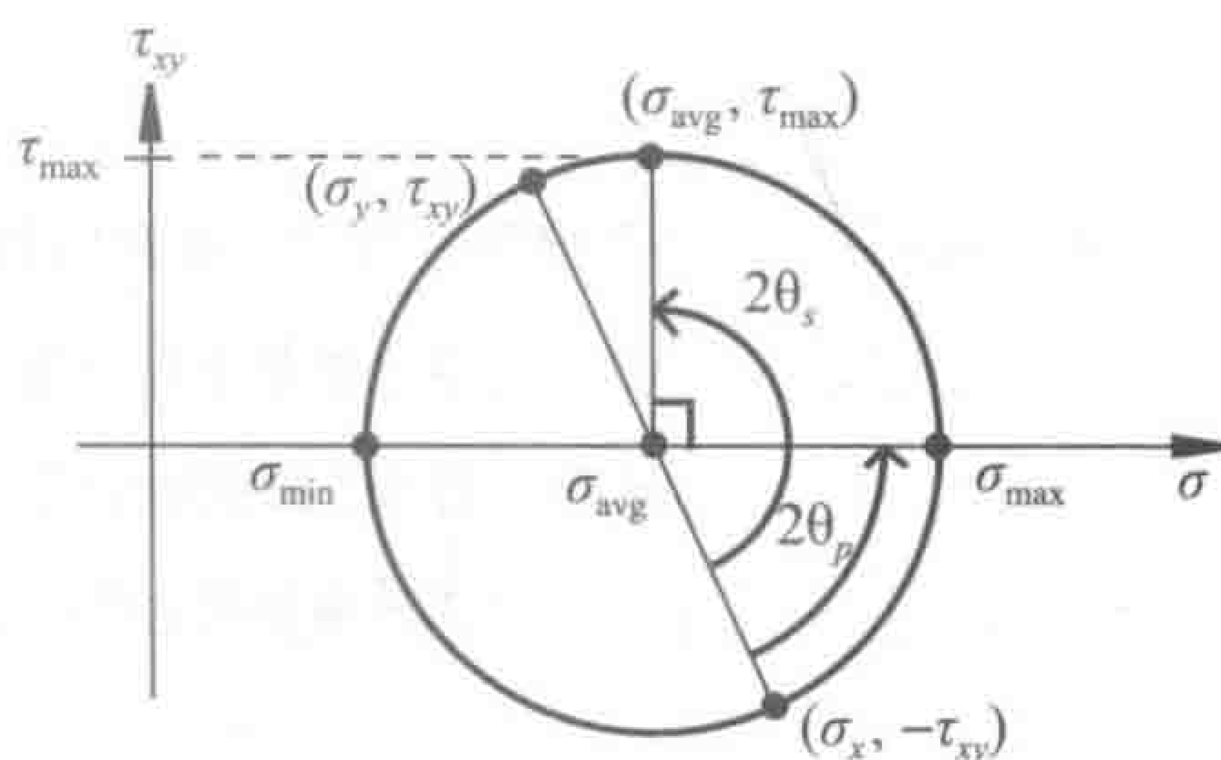


图 C-3 平面应力的莫尔圆

正常拉伸应力是正值，而压缩正常应力为负值。如图 C-3 所示，对应于图 C-2 所示的单元，正应力是拉应力。当剪切应力绕着中心顺时针旋转时，符号为正，反之为负。对于图 C-2 所示的元素来说，在元素 σ_x 一侧的剪切应力 τ_{xy} 为负值，因为它使元素逆时针旋转，反之在元素 σ_y 一侧的剪切应力为正值。注意，原始应力方向与主应力方向之间的角度(θ_{p})是围绕圆的同一方向上测量得到的，但圆上的角度是实际测量角度的两倍($2\theta_{\mathrm{p}}$)。如图 C-2 所示，θ_{p} 是从 σ_x 到 $\sigma_{\max}$逆时针测量得到的，所以图 C-3 所示的 σ_x 与 $\sigma_{\max}$间的 $2\theta_{\mathrm{p}}$ 角也是沿逆时针方向测量的。还要注意，主应力的方向和最大剪应力的方向总是在莫尔圆上呈 90°分布的(与实际元素呈 45°)。可以得到验证的是 $\tan(2\theta_{\mathrm{p}})$与 $\tan(2\theta_{\mathrm{s}})$间存在负倒数的关系[如式(C-9)和(C-14)所示]。网络链接 C.1 给出了轴向力莫尔圆方程的推导过程，视频演示 C.1 讨论并演示了结果。视频演示 C.2 讨论了莫尔圆是帮助理解为什么一个脆性和韧性材料在破坏时会表现出不同的断裂形式。

课堂讨论项目 C.1　　拉伸断裂面的方向

当金属杆件在轴向拉力作用下失效时，断裂平面与轴向呈 45°的对应关系。为什么？

参考文献

Beer, F. and Johnston, E., *Mechanics of Materials,* 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 2008.

Dally, J. and Riley, W., *Experimental Stress Analysis,* 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.